



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE SIMULÁTORU KYČELNÍHO KLOUBU

DESIGN OF HIP JOINT SIMULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Peter Žonda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Peter Žonda**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukce simulátoru kyčelního kloubu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh simulátoru kyčelního kloubu s proměnným zatěžováním pro analýzu tloušťky mazacího filmu a opotřebení v umělých kyčelních náhradách.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Konceptní řešení
5. Konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení

Typ práce: konstrukční

Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: funkční vzorek

Projekt: IGA MZ

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků)

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Affatato, S., Spinelli, M., Zavalloni, M., Mazzega-Fabbro, C. and Viceconti, M. (2008): Tribology and total hip joint replacement: current concepts in mechanical simulation. Medical Engineering & Physics, vol. 30, no. 10, pp. 1305-1317, DOI:10.1016/j.medengphy.2008.07.006.

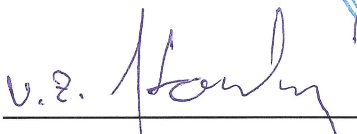
Ortega-Sáenz, J. A., Hernández-Rodríguez, M. A. L., Pérez-Unzueta, A. and Mercado-Solis, R. (2007): Development of a hip wear simulation rig including micro-separation. Wear, vol. 263, no. 7-12, pp. 1527-1532, DOI:10.1016/j.wear.2007.01.097.

Vrbka, M., Nečas, D., Hartl, M., Křupka, I., Urban, F. and Gallo, J. (2015): Visualization of lubricating films between artificial head and cup with respect to real geometry. Biotribology, vol. 1-2, pp. 61-65, DOI:10.1016/j.biotri.2015.05.002.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 24. 11. 2015





prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom a realizáciou experimentálneho simulátora bedrového kĺbu. Primárnym využitím je štúdium hrúbky mazacieho filmu v umelých bedrových náhradách pomocou metódy interferometrie. Sekundárne využitie je aplikácia pre štúdium dlhodobého opotrebenia umelých bedrových náhrad. Práca prvotne popisuje už existujúce simulátory bedrového kĺbu, ktoré simulujú konkrétne kĺbové uloženie. Následne diplomová práca predkladá vlastné návrhy a riešenia autora. Výsledkom je zhotovené zariadenie umožňujúce dynamickú zmenu záťaže pri simulovaní pohybu flexie a extenzie bedrového kĺbu stanovené ISO normou. Kontakt je zaznamenávaný optickou aparaturou zloženou z vysokorýchlostnej kamery a mikroskopu. Súčasťou práce je zároveň úvodný overovací experiment a kompletná výkresová dokumentácia celého zariadenia spolu s elektrickou schémou zapojenia.

KEÚČOVÉ SLOVA

Optická interferometria, simulácia styku konformných povrchov, simulátor bedrového kĺbu, hrúbka mazacieho filmu

ABSTRACT

The master's thesis is concerned with design and execution of an experimental acetabulofemoral joint simulator. Its primary use is the study of lubrication film thickness in hip implants. The work first describes available hip joint simulators, which simulate particular joint positions. Next, the thesis proposes author's own designs and solutions. The result is a produced device allowing for dynamic change of load in simulation of hip joint flexion and extension as set by ISO standard. Contact is recorded by an optical apparatus composed of a high-speed camera and a microscope. The work also includes the initial testing experiment and the complete design documentation of the device including electrical wiring diagrams.

KEYWORDS

Optical interferometry, contact simulation surfaces, artificial hip joint simulator, lubricant film thickness

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŽONDA, P. *Konstrukce simulátoru kyčelního kloubu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 106 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D..

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že predloženú prácu som vypracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Martina Vrbku, Ph.D. Použil som len zdroje uvedené v zozname použitej literatúry.

V Brne dňa 20. mája 2016

.....
Peter Žonda

POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať vedúcemu práce doc. Ing. Martinovi Vrbkovi, Ph.D. za odborné vedenie, poskytnuté rady a cenné pripomienky. Následne by som chcel poďakovať Ing. Zbynkovi Štekrovi, Ph.D. za pomoc a kontrolu elektrickej časti zariadenia, taktiež Ing. Petrovi Šperkovi a doc. Ing. Petrovi Svobodovi, Ph.D. za cenné rady a tiež pánovi Konečnému za pomoc pri montovaní zariadenia. Zároveň chcem poďakovať rodine a priateľke za podporu a ústretovosť počas štúdia.

OBSAH

1 ÚVOD	13
2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	14
2.1 História a vývoj endoprotéz	14
2.2 Zaťaženie a kinematika bedrového kĺbu	14
2.3 Metódy riešenia simulátorov	16
2.3.1 PLINT Durham friction simulator	16
2.3.2 Simulátor z Hamburg University of Technology	18
2.3.3 Simulátor FIME II	19
2.3.4 Simulátor z Technickej univerzity v Helsinkách	20
2.3.5 Trojosí kĺbový simulátor	21
2.3.6 Kyvadlo bedrového kĺbu	23
2.4 Optická interferometria	24
2.4.1 Acetábulum	25
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIELE PRÁCE	26
3.1 Ciele práce a rozsah autorovej práce	27
4 KONCEPČNÉ RIEŠENIA	28
4.1 Prvý variant	28
4.2 Druhý variant	29
4.3 Zvolený variant	30
5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE	31
5.1 Vrchná mechanická časť	31
5.1.1 Pneumatický valec	32
5.1.2 Temzometre	33
5.1.3 Kývavý a posuvný rám	35
5.1.4 Motor s prevodovkou	41
5.1.5 Platňa pod miskú s acetábulom	46
5.1.6 Výmena hlavice a acetábulovej misky	48
5.1.7 Prípravok na vystredovanie hlavice	50
5.2 Spodná mechanická časť	53
5.2.1 Posuvná plošina	54
5.2.2 Nosný rám	55
5.2.3 Optická aparatura	55
5.2.4 Pevnostná analýza	55
5.3 Pneumatický systém a PLC riadiaca jednotka	57
5.4 Rámová konštrukcia	58
5.4.1 Základová platňa	59
5.4.2 Stredná časť rámu	59
5.4.3 Vrchná časť rámu	62
5.4.4 Spodná časť rámu	62
5.4.5 Pevnostná analýza rámovej konštrukcie	63
5.5 Rozvodová skriňa	64
5.5.1 Návrh	64
5.5.2 Schéma zapojenia	66
5.6 Programovacia podpora	67
5.6.1 PLC	67
5.6.2 Frekvenčný menič	68

5.6.3 Meracia karta	69
5.7 Cenová rozvaha	70
5.8 Úvodné testovacie meranie	71
5.8.1 Podmienky merania	71
5.8.2 Pracovný postup merania	71
5.8.3 Namerané výsledky	71
5.8.4 Zhodnotenie	74
6 DISKUSIA	77
7 ZÁVER	81
8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	82
9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	85
10 ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV GRAFOU A TABULIEK	87
11 ZOZNAM PRÍLOH	89

1 ÚVOD

1

Tribológia z pohľadu vednej disciplíny kombinuje štúdium trenia, mazania a opotrebenia. Cieľom predkladanej diplomovej práce je vytvoriť tribologický modul určený k skúške správania sa maziva medzi konformnými povrchmi umelých kĺbových náhrad bedrového kĺbu.

Dnes sú bežne používané prístroje na skúmanie kĺbových náhrad a obvykle sa zameriavajú na štúdium opotrebenia a trenia. V súčasnej dobe prebieha výskum opotrebenia, trenia a mazania kontaktných povrchov umelých kĺbových náhrad. Výskum pomáha najmä výrobcovi umelých kĺbových náhrad, aby boli vyrábané dostačujúco pre používateľa. Do tohto výskumu patrí tiež tribologická výskumná skupina Ústavu konštruovania.

V roku 2013 vznikla konštrukcia experimentálneho zariadenia pre analýzu trenia v umelom bedrovom kĺbe. Jeho funkcia je založená na princípe kyvadla. Súčiniteľ trenia medzi hlavicom a jamkou umelej náhrady je stanovený na základe útlu kyvadla. V súčasnosti je experimentálne zariadenie odladené avšak nie dostačujúco.

Pre ďalšie typy experimentov hrúbky mazacieho filmu je potrebné vytvoriť nový simulátor bedrového kĺbu s optimálnymi rozmermi. Bolo by možné ho využívať v laboratóriách Ústavu konštruovania a taktiež by bol cenovo výhodnejší oproti už podobne vyrobeným simulátorom. Cieľom je sa čím najviac priblížiť k ISO norme definovanej pre umelé bedrové kĺby ako z pohľadu vyvinutia veľkosti záťaže, tak z pohľadu veľkosti náklonu v definovanom časovom rozpätí. Súčasný zariadenie má určité obmedzenia ako z hľadiska kinematického, tak aj zo záťažového. Aktuálne kyvadlo dokáže vytvárať náklon v rozpätí iba $\pm 16^\circ$, čo je z aspektu ISO normy nedostačujúce. Taktiež nie je možné na súčasnom zariadení dynamicky meniť záťaž počas chodu zariadenia. Všetky tieto nevýhody by mali byť hlavným cieľom pre lepší návrh novo vytvoreného simulátora bedrového kĺbu. Zároveň, aby tribologická výskumná skupina Ústavu konštruovania mohla vytvárať nové výskumy a štúdie v umelých bedrových náhradách.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

V každom bedrovom kĺbe dochádza ku styku dvoch konformných povrchov a to medzi hlavou femuru a acetábulom, kde dochádza k jeho opotrebeniu. Poškodenie je chápané ako postupné oddeľovanie materiálu zo stykajúcich sa povrchov. K opotrebeniu dochádza niekoľkými metódami. Ich spôsob sa snaží obmedziť vhodné optimalizovanie materiálov a podmienky mazania v kontakte. Ide prioritne o opotrebenie mechanické, adhézne a abrazívne.

Existuje rozsiahla škála výskumov, ktorá skúma mazacie podmienky v kĺbe. Orientuje sa v prvom rade na meranie opotrebenia ako takého, meranie súčiniteľa trenia a na meranie hrúbky mazacieho filmu. K študovaniu podmienok panujúcich v bedrovom kĺbe endoprotézy sa využívajú simulátory, ktoré sa snažia čo najvierohodnejšie simulovať podmienky „in vivo“. Následne môžu merať súčiniteľ trenia v chrupavkách, ale aj v endoprotézach.

2.1 História a vývoj endoprotéz

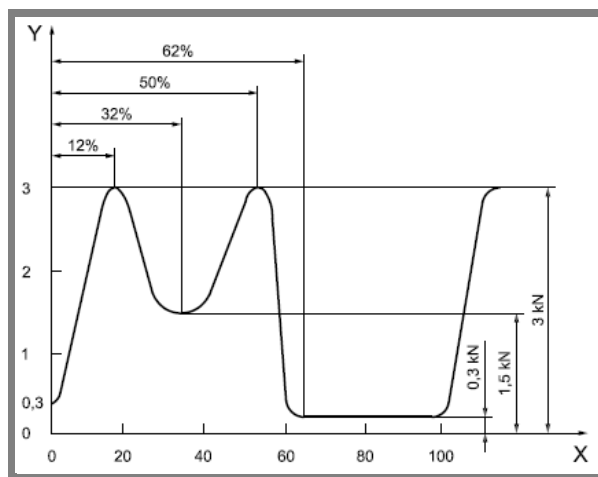
Prvé pokusy o náhradu bedrového kĺbu bol uskutočnený Carnochanom v New Yorku v roku 1840. Tento pokus nebol úspešný. Implementovaným materiálom v štúdií bolo drevo. Veľký pokrok v oblasti endoprotéz bol dosiahnutý medzi 19. a 20. Storočím. Skupina vedcov a doktorov z Anglicka, Francúzska, Nemecka a USA vtedy vytvárali rôzne konštrukcie endoprotéz, ktoré však neboli úplné. Často išlo o čiastkovú náhradu alebo vložku medzi hlavicou stehennej kosti a jamkou. Napríklad Sir Rober Jones publikoval v roku 1929 článok, kde popisoval, ako rekonštrukciu hlavy bedrového kĺbu pokryl malou vrstvou zlata, išlo o jednu z prvých úspechov operácií. [13]

Philip Wiles v roku 1938 zostrojil a taktiež voperoval jednu z prvých endoprotéz. Hlavica a jamka boli precízne vyrobené z kovu a pripevnené k stehennej kosti. Spomínaná operácia bola nakoniec neúspešná, keďže došlo uvoľneniu kvôli skrutkovému spoju [14].

Do podoby, akú majú terajšie endoprotézy, ich dal „zásluhou“ inovatívny anglický chirurg, John Charnley. Skúmal zvierací kĺb a zistil že je potreba nájsť materiál, ktorý by zastupoval chrupavku a zaistoval veľmi nízke trenie. Kvôli nedostatku odolnosti voči opotrebeniu bolo potrebné hľadať materiály. Vhodnou voľbou boli UHMWPE, ktoré majú o 500 až 1000 krát väčšie odolnosti oproti opotrebeniu ako teflón. Charnley uviedol endoprotézu s UHMWPE v roku 1962 a v roku 1968 bol tento typ endoprotézy už komerčne využívaný. Následne prišlo vylepšenie využitia UHMWPE uhlíkovými vláknami a využitie keramických hlavíc [13].

2.2 Zaťaženie a kinematika bedrového kĺbu

Pri testovaní kĺbových náhrad v komerčných simulátoroch sa bežne postupuje podľa normy ISO 14242 [4]. Tá udáva presný postup merania. Zároveň uvádza aj kinematiku a zaťaženie pre používanie v simulátoroch. Cyklus popisuje veľkosť prenášaného zaťaženia kĺbom počas bežného chodenia. Komplexné meranie zaťaženia prenášané bedrovým kĺbom meral Bergman a jeho kolektív [5]. Popisujú zaťažovacie podmienky pre každodenné aktivity akými sú chôdza, beh po schodoch a ďalšie.

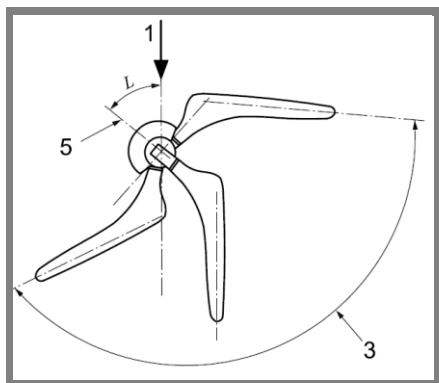


Obr. 2-1 Zaťažovací cyklus: x-os čas cyklu v sekundách, y-os veľkosť zaťaženia v kN[4]

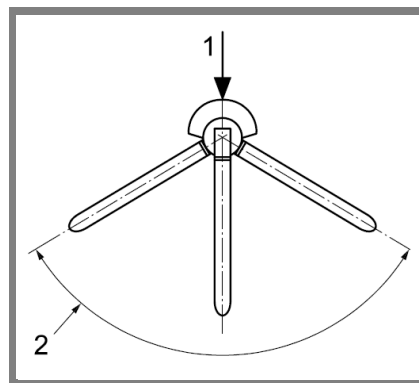
Mnoho autorov vo svojich publikáciách uviedlo zaťaženie kĺbu alebo taktiež kontaktné sily v kĺbových dvojiciach. Štúdie týkajúce sa kinematiky kĺbu sú veľmi zriedka publikované. Je to dané veľkými variantmi v geometrii biologických aj umelých kĺbov. Rozdiely vznikajú pri rôznych vekových a rasových skupinách pacientov. Rozdiely sú aj pri kĺbových náhradách, kde majú výrobcovia možnosť upraviť ich tvar. Preto štúdie zaoberajúce sa týmto problémom si vyžadujú rozsiahle merania so zriedkavejším publikovaním [6].

Norma [4] udáva uhol medzi osou zaťaženia a čelnou rovinou acetabulárnej časti celkovej kĺbovej náhrady (THR) $60^\circ \pm 3^\circ$. Profesor Zhongmin Jin z Institut lekárskeho a biologického inžinierstva uvádza v jednej zo svojich prezentácií hodnotu tohto uhla 55° . Aj tu je potom vidieť určitý rozdiel. Preto simulátormi navrhnutými pre pozorovanie opotrebenia alebo ako v prípade tejto práce, pre meranie mazacieho filmu, môžeme len ťažko pokryť všetky kategórie pacientov potrebných celkovú kĺbovú náhradu.

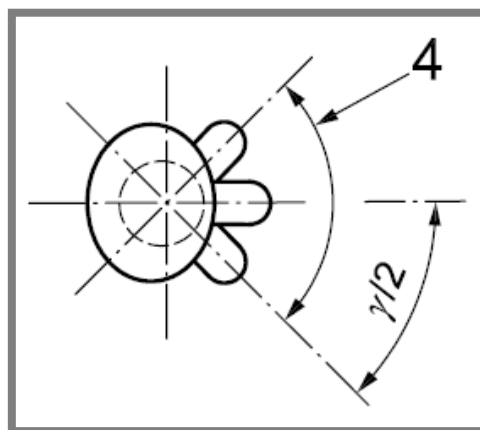
Kinematiku pre simulovanie THR následne predpisuje norma v cykle, udávajúcim priebeh posuvu a zaťaženia v jednotlivých smeroch. Pri simulátoroch sa najčastejšie uvažuje o vertikálnom zaťažení a z pohybu flexia - extenzia. Ďalšie pohyby kĺbu abdukcia - addukcia, rotácia vnútorná – vonkajšia a zaťaženie v horizontálnej rovine sa následne vyskytujú veľmi zriedka [6].



Obr. 2-2 Abdukcia/addukcia [4]



Obr. 2-3 Flexia/extenzia [4]



Obr. 2-4 Vnúťorná/vonkajšia rotácia[4]

2.3 Metódy riešenia simulátorov

Možností, ako riešiť konštrukčnú stránku simulačného modulu pre štúdium opotrebenia alebo mazacieho filmu je niekoľko. Jednotlivé moduly sa diferencujú hlavne usporiadaním kĺbových hlavíc a kĺbových jamiek. Zároveň sú rozlišované riešenia zatopenia skúmaného kontaktu a mechanizmu pre jednotlivé výskumy.

V študijnom prieskume od S. Affatato a spol. [1] môžeme vidieť simulátory súčasné, ale aj používané v minulosti. Pričom by sme ich mohli rozdeliť na dve hlavné časti: motorové a mechanické simulátory.

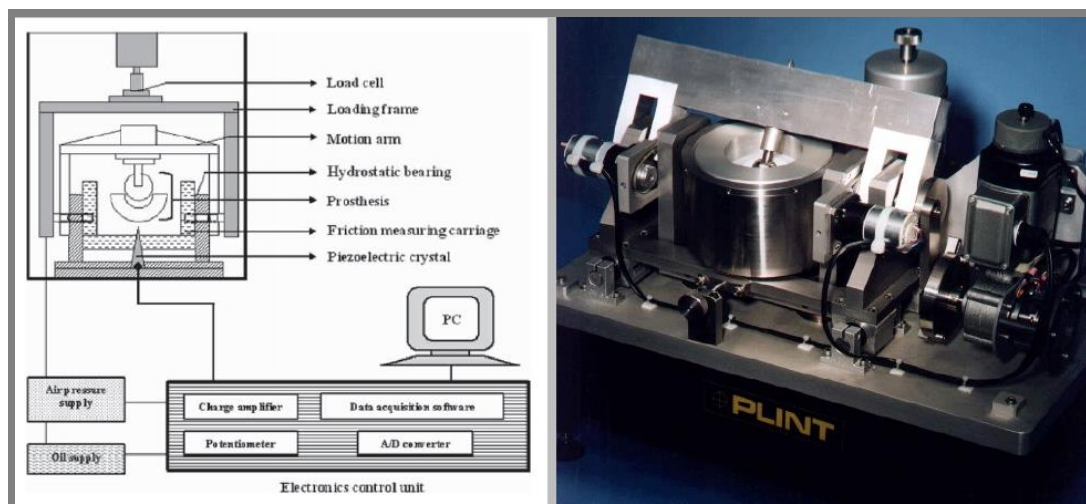
Motorové simulátory sa používajú k veľmi blízkeho napodobeniu reálnych podmienok. Sú temperované na ľudskú teplotu a zaťažovaný cyklus. Pracujú za podpory počítačového riadenia, ktorý je podobný ako ten v bedrovom kĺbe. Simulátory sú využívané na meranie súčiniteľa trenia, ale aj na meranie opotrebenia. Z toho sa najčastejšie určuje koeficient čapového trenia.

Mechanické simulátory (kyvadlové) sa používajú k meraniu súčiniteľa trenia hlavne na chrupavkách, ale aj na biologických sústavách bedrového kĺbu (TEP) [2]. Vychádza sa z predpokladov, že strata energie zo systému je spôsobená výhradne trením v kĺbe používaným ako stred otáčania. Odpor vzduchu sa neberie do úvahy. To sa prejaví ako útlm amplitúdy v čase.[3]

2.3.1 PLINT Durham friction simulator

Charakteristika

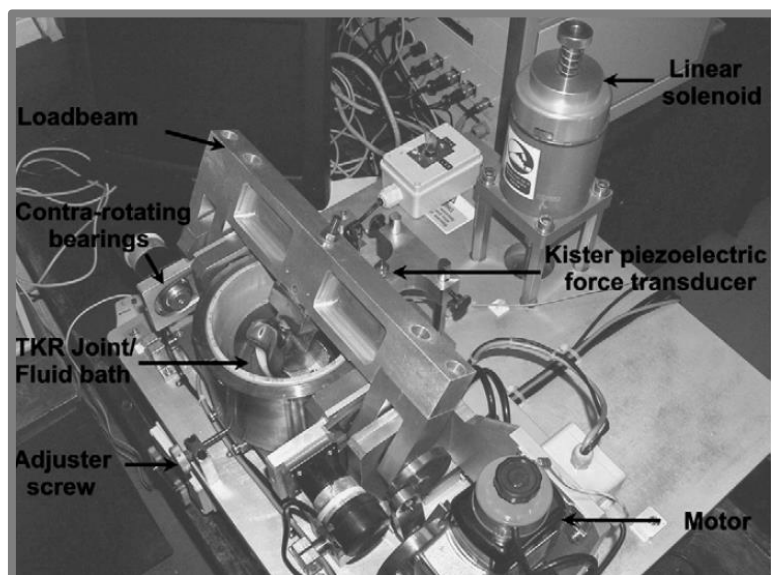
Simulátor bol vyvinutý na priame meranie súčiniteľa trenia na umelých bedrových a kolenných kĺboch. Taktiež sa využíva aj pre iné aplikácie ako je meranie trenia na chrupavkách. Zariadenie je navrhnuté vývojovým strediskom Phoenix Tribology v Newbury (Anglicko) [7].



Obr. 2-5 PLINT Durham friction simulator [7]

Fungovanie

Kĺb je umiestnený v prevrátenej polohe - oproti reálnemu uloženiu v ľudskom tele. Vrchná časť vykonáva kývavý pohyb spolu s kĺbovou hlavicou. Kývavá časť je v ráme uchytaná pomocou hydrostatických ložísk a silo merného člena. Hydrostatické ložiská majú zanedbateľný súčiniteľ trenia oproti treniu v kĺboch. Pohon je vykonávaný pomocou motora. Pohon je prepojený s kývavým rámom kľukovým mechanizmom, ktorý tak zabezpečuje kývavý pohyb v rozsahu $\pm 32,5^\circ$. Silo merný člen sa používa na meranie súčiniteľa čapového trenia v kĺbe. Zaťažovanie je realizované pomocou hydraulického valca, kde sila z valca je prenesená pákovým mechanizmom v pomere 9:1. Pôsobenie sily je zospodu acetábula kolmým smerom nahor. Popis simulátora je uvedený na obrázku nižšie [7].

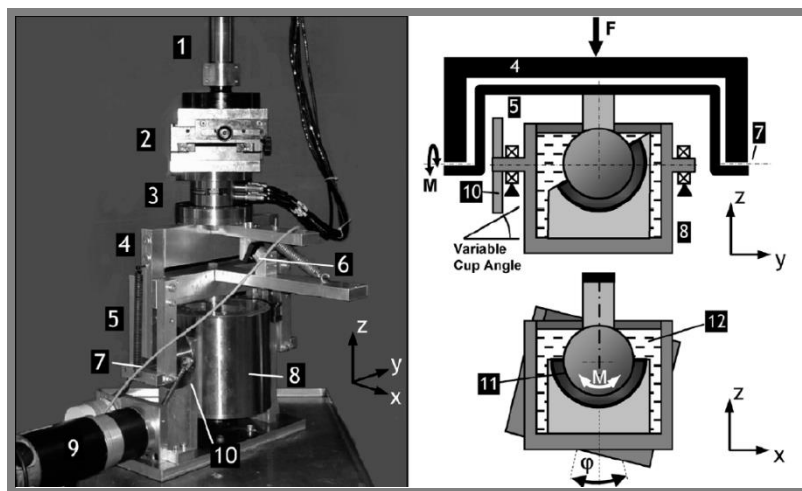


Obr. 2-6 Popis jednotlivých častí simulátora [7]

2.3.2 Simulátor z Hamburg University of Technology

Charakteristika

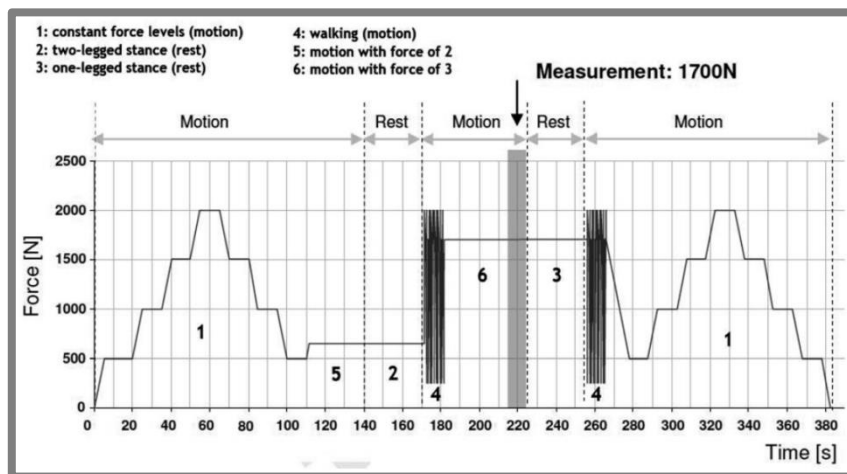
Simulátor je skonštruovaný pre meranie trecieho momentu v umelom bedrovom kĺbe. Jeho konštrukcia je iná ako u predchádzajúceho. Poloha kĺbu je takisto prevrátená oproti polohe „in vivo“, ale kývavý pohyb tu vykonáva rám s acetábulom a hlavica kĺbu je nehybná. Zariadenie bolo vyvinuté na Hamburskej Technickej univerzite.



Obr. 2-7 Simulátor z Hamburg University of Technology [8]

Fungovanie

Zaťaženie je vyvolávané pomocou hydraulického valca (3). Nad ním je dvojosá posuvná plošina (2) na polohovanie sily spolu s osovým regulátorom. Pod zaťažovacím členom je horný (4) a spodný (5) rám. Merací člen (6) spája tieto dva rámy. Spodný rám je prepojený so servomotorom (9), ktorý umožňuje náklon $\pm 20^\circ$. V hriadieli (10) je umiestnená kĺbová jamka (11), pričom je všetko zaplavené mazivom. Hydraulický valec dokáže vyprodukovať zaťažovaciu silu 2000N. Priebeh zaťaženia je vidieť na obrázku nižšie. Merania boli uskutočnené na kĺbovej hlavici s priemerom 32 mm.

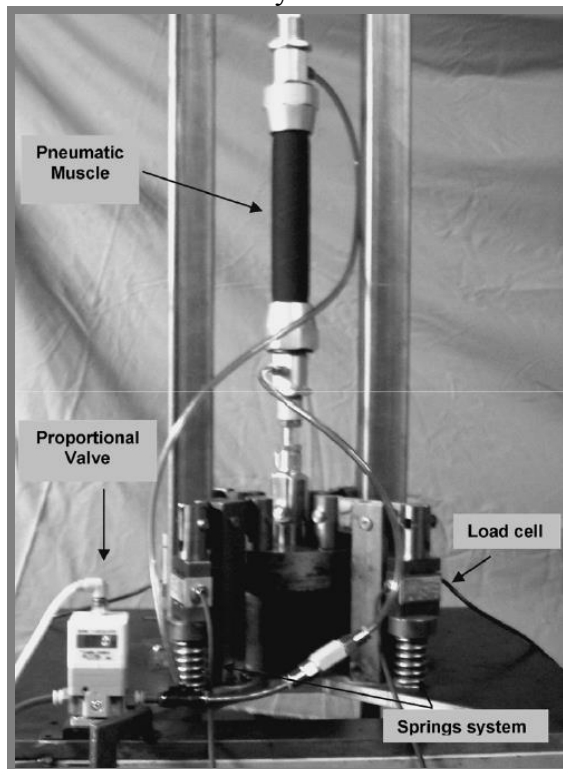


Obr.2-8 Priebeh zaťažovania[8]

2.3.3 Simulátor FIME II

Charakteristika

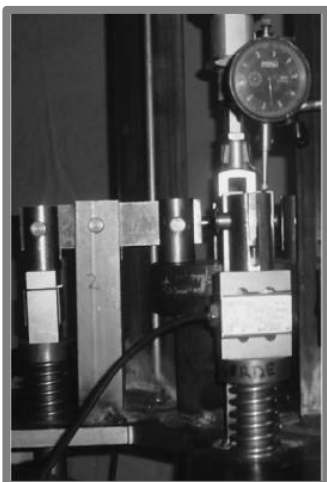
Simulátor vytvára zaťaženie pomocou pneumatického svalu. Na rozdiel od predchádzajúcich simulátorov je z konštrukčného hľadiska uloženie kĺbového spoja v rovnakom poradí ako v ľudskom tele. Pneumatický sval je schopný vytvárať vysoké zaťaženia za pomoci tlaku a kvôli tomu nie je možné, aby tento mechanizmus prenášal tlak. Preto je ťah tohto svalu premenený na tlak za použitia pákového konštrukčného riešenia. Simulátor sa používa na meranie mikroseparácií v kĺbovom uložení. Dokáže vykonávať meranie na štyroch hlaviciach súčasne.



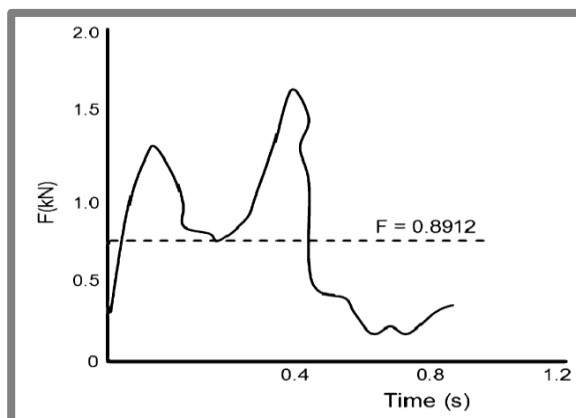
Obr.2-9 FIME II [9]

Fungovanie

Pneumatický sval ťahá za plošinu, ktorá je prepojená na štyri zaťažovacie hlavice. Na obrázku 9 je vidieť rozloženú silu pomocou pákového systému v pomere 1:1. Zariadenie simuluje všetky tri pohyby a to v rozmezí $FE \pm 23^\circ$, $AA \pm 23^\circ$, $IER \pm 7,5$. Rotácie sú zabezpečené pomocou sevomotorov. Na riadenie zaťažovacej sily je použitý proporcionálny ventil, ktorý riadi prívod vzduchu do svalu. Maximálna sila, ktorú dokáže sval vyprodukovať je 4 kN s uvádzanou presnosťou $\pm 1\%$. Zátťažovací diagram simulátora na jednej hlavici je uvedený na obr 10.



Obr.2-10 Detail páky [9]



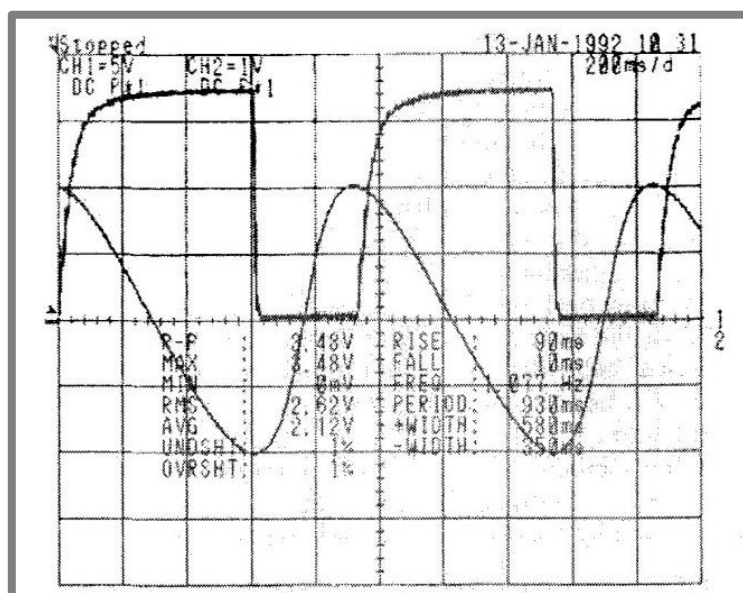
Obr.2-11 Zaťažovací cyklus

2.3.4 Simulátor z Technickej univerzity v Helsinkách

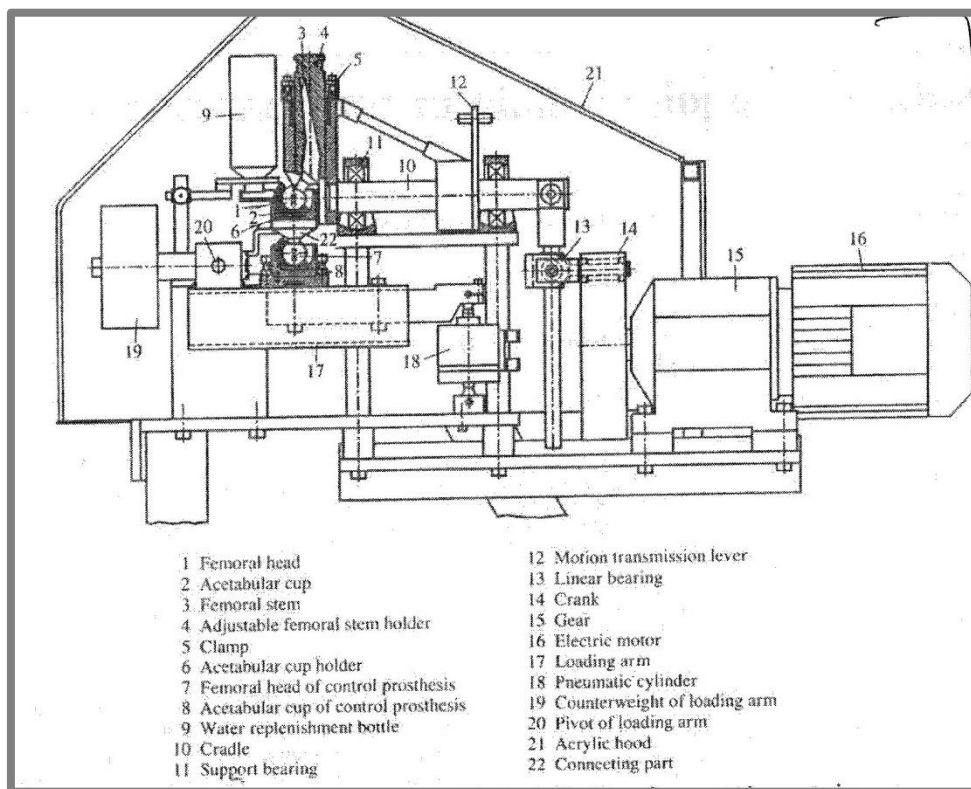
Charakteristika

Päťstanícový simulátor bol navrhnutý, zložený a testovaný na Technickej univerzite v Helsinkách. Zariadenie umožňuje testovanie piatich kĺbových hlavíc bedrového kĺbu súčasne. Testované pohyby sú flexia - extenzia kĺbu s pevne danou záťažovou silou. Pohyb zabezpečuje elektromotor a záťaž je pomocou pneumatiky. Zaťaženie a uhly natočenia jednotlivých pohybov sú nemenné a simulujú úroveň chôdze. Simulátor je zhotovený iba na pozorovanie opotrebenia daného kĺbového uloženia.

Na obr. 1-12 je vidieť pevne dané parametre zariadenia, ktorými sú zaťažovacia sila 3,5 kN a uhlové natočenie flexie - extenzie v rozpätí $\pm 30^\circ$ [17].



Obr. 2-12 Zaťažovací cyklus [17]



Obr. 2-13 Mechanický popis zariadenia [17]

Fungovanie

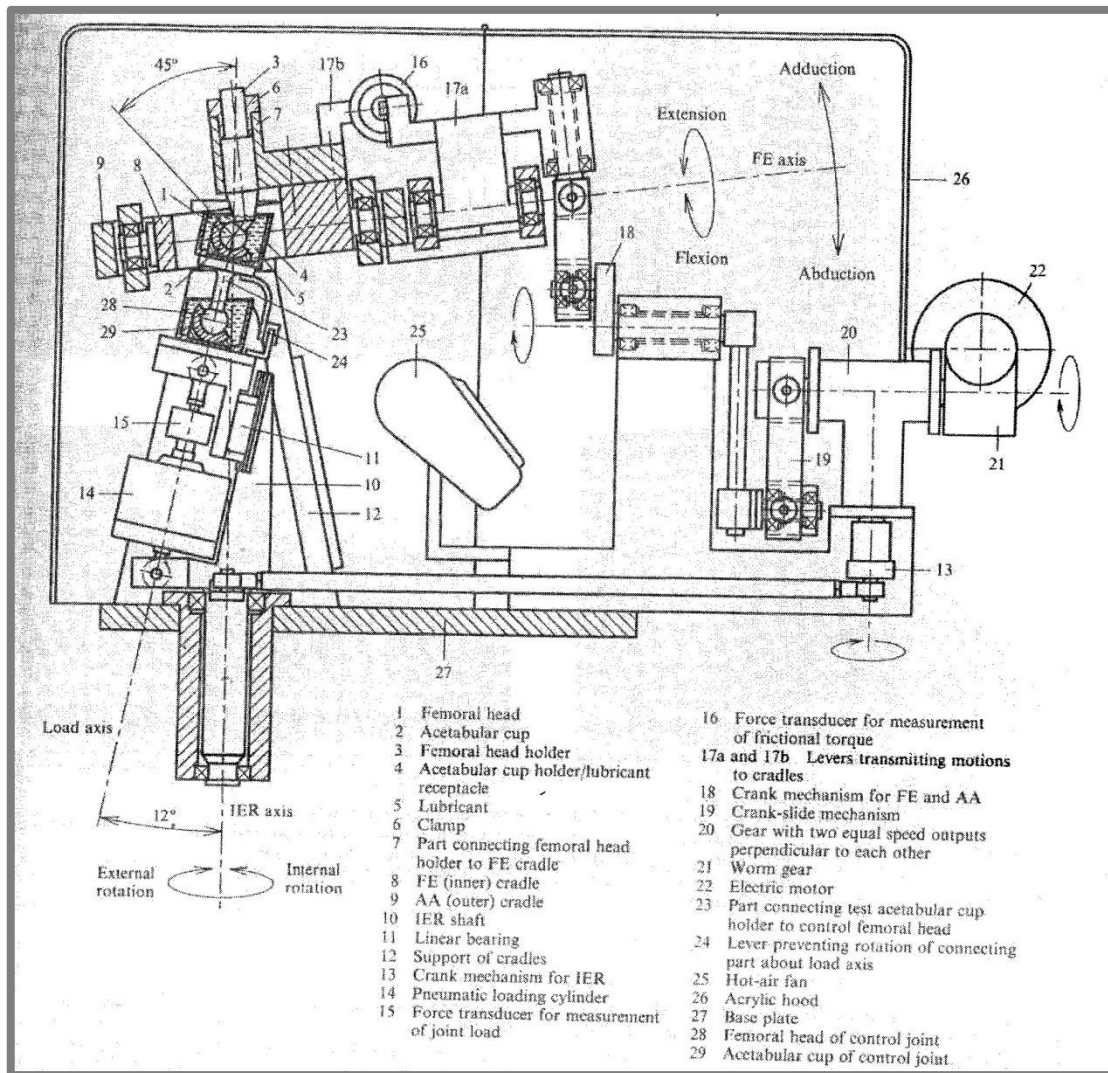
Motor je napojený na prevodovku. Výsledný pohyb je prenesený pomocou ložísk a hriadeľov k femorálnej hlavici. Zariadenie používa dve femorálne hlavice z čoho jedna je podporná a to pre lepšie prispôsobenie sa testovanej hlavici v acetábulovej jamke. Tým je vyriešené to, aby sa zariadenie prispôbilo kĺbovému uloženiu. Obrázok vyššie ilustruje záťaž produkovanú zo spodnej časti a to pomocou pneumatického valca, kde je sila prenášaná pomocou ramena. Pomer páky štúdia neuvádza. Maximálna použiteľná sila valca je až 8 kN. Na zariadení boli podľa štúdií skúmané hlavice s rozmermi 32 mm a 22,2 mm pri použití hlavice z nehrdzavejúcej oceli, hliníka a liatin titánu [17].

2.3.5

2.3.5 Trojosí kĺbový simulátor

Charakteristika

Trojosí kĺbový simulátor z jednou testovacou stanicou bol navrhnutý a postavený na štúdie zoberajúce sa opotrebením umelých protéz bedrového kĺbu. Zariadenie dokáže nasimulovať úroveň chôdze človeka. Medzi simulované pohyby patrí flexia - extenzia, abdukcia - addukcia a vnútorné a vonkajšie otáčanie. Pohyb je zabezpečovaný elektoro-mechanicky pri zaťažovaní pneumatikou. Na prístroji boli simulované iba hlavice s priemerom 32 mm [16].



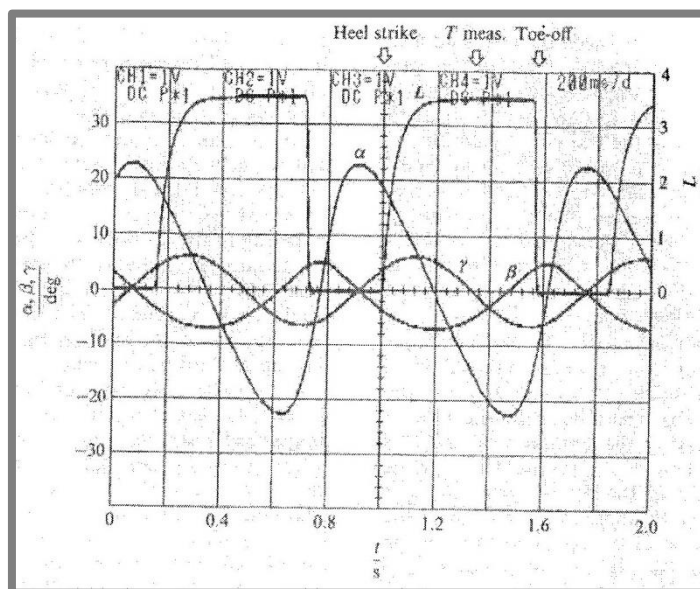
Obr. 2-14 Schematický popis zariadenia [16]

Na obr. 1-14 je znázornený simulátor, kde: 1. femorálna hlavica, 2. acetábulová jamka, 3. femorálny hlavicový držiak, 4. držiak acetábulovej jamky, 5. mazivo, 6. upínadlo, 7. časť prepájajúca femorálnu hlavicu pridržiavača na fexciu - extenziu rámu, 8. rám pre fexiu - extenziu, 9. rám pre AA, 10. rotácia hriadeľa pre vonkajšiu – vnútornú rotácia, 11. lineárne ložiská, 12. podporný rám, 13. hriadeľový mechanizmus pre IER, 14. pneumatický zaťažovací valec, 15. merný element pre meranie zaťažovacej sily, 16. element pre meranie momentu, 17a.17b. podporný rám, 18. hriadeľový mechanizmus pre FE a AA, 19. klzný hriadeľový mechanizmus, 20. prevodovka, 21. závitová prevodovka, 22. elektromotor, 23. prepájacia časť na kontrolu femorálnej hlavice, 24. prepojavacia časť, 25. ohrievač, 26. akrylový kryt, 27. základná platňa, 28. podporná femorálna hlavica, 29. podporná acetábulová jamka

Fungovanie

Zariadenie využíva závitovú prevodovku pre regulácie otáčok ako aj prevodovku na rozdvojenie, aby mohol zabezpečiť všetky tri druhy požadovaného otáčania. Tento simulátor tiež využíva podporné acetábulum a femorálne hlavice preto, aby zabránil

zlému prispôsobeniu sa stroja danému kĺbovému uloženiu. Zariadenie využíva na zaťaženie pneumatický valec, na ktorý je napojený merný element a z neho je prepojený na pozorovanú hlavicu. Acetábulum je zahrievané pomocou ohrievača, aby malo požadovanú teplotu. Na obr. 1-15 vidieť pevne dané hodnoty spomínaného simulátora. Kde náklon FE je $\pm 23^\circ$, AA náklon je 7° a IER náklon je $\pm 5,5^\circ$. Pracuje pri frekvencii 1 Hz s použitím maximálnej sily 3,5 kN. Nárast sily na 3,5 kN je 90 ms.[16]



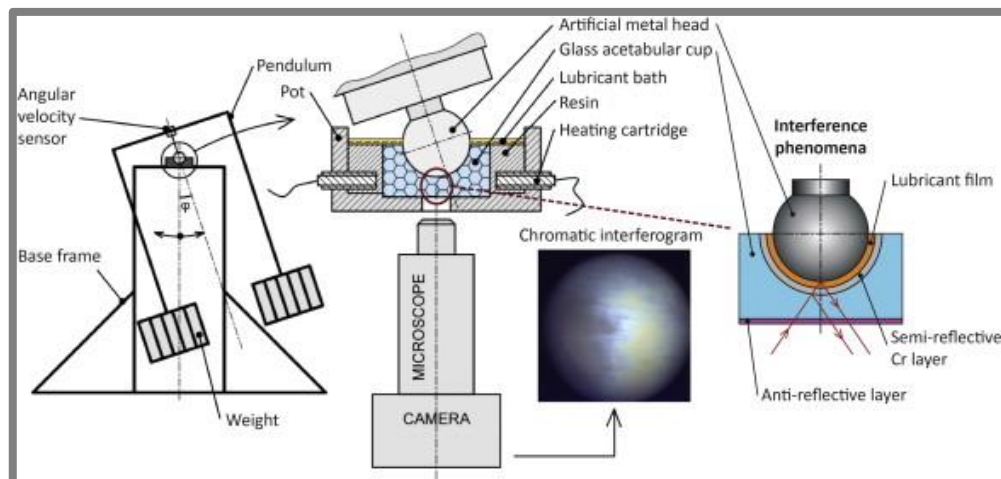
Obr. 2-15 Zaťažovací cyklus [16]

2.3.6 Kyvadlo bedrového kĺbu

2.3.6

Charakteristika

Simulátor pracuje ako kyvadlo. Zariadenie sa využíva na Ústave konštruovania a slúži na pozorovanie hrúbky mazacieho filmu metódou interferometrie a na štúdiu trenia. Pri pozorovaní hrúbky mazacieho filmu je použitá optická aparatura, ktorá zo spodnej časti zariadenia zaznamenáva hrúbky mazacieho filmu medzi kĺbovým uložením. Simulátor má možnosť výmeny kĺbových hlavíc, ale aj kĺbových jamiek. Súčasne je doplnený o modul ohrevu. Ten zaisťuje realizáciu experimentu za premennej teploty. Zároveň je pridané riadenie frekvencie pomocou riadeného magnetu. Na koniec je tiež vylepšené pozorovanie hrúbky mazacieho filmu pomocou interferometrie za použitia mikroskopu a vysoko rýchlostnej kamery [18].

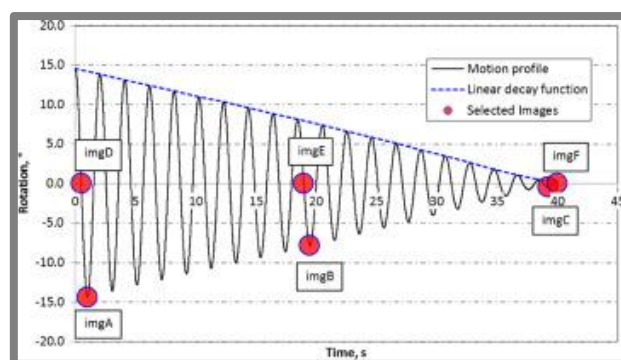


Obr. 2-16 Schéma fungovania zariadenia [18]

Fungovanie

Konštrukcia zariadenia je mechanicky stavaná formou kyvadla. Z toho dôvodu je zariadenie obmedzené ako kinematicky, tak aj frekvenčne. Jeho hraničné hodnoty sa pohybujú v rozpätí kývania $\pm 16^\circ$, vzhľadom na frekvenciu sa vie docieľiť 2 Hz. Výhodou tohto zariadenia je samotné prispôbenie sa kĺbovému spoju, pretože kyvadlová časť zariadenia je iba položená na jamke s acetábulom. To zaisťuje samotné prispôbenie sa danému kĺbovému uloženiu zariadenia. Simulátor má za sebou viacero meracích štúdií týkajúcich sa opotrebenia a tiež aj samotného skúmania hrúbky mazacieho filmu za pomoci interferometrií. Pri štúdií bola použitá konštantná záťaž o veľkosti 532 N [18].

Nevýhodou zariadenia je obmedzenie uhla kývania, ako aj to, že na zariadení nie je možné dynamicky meniť zaťaženie počas samotného merania.

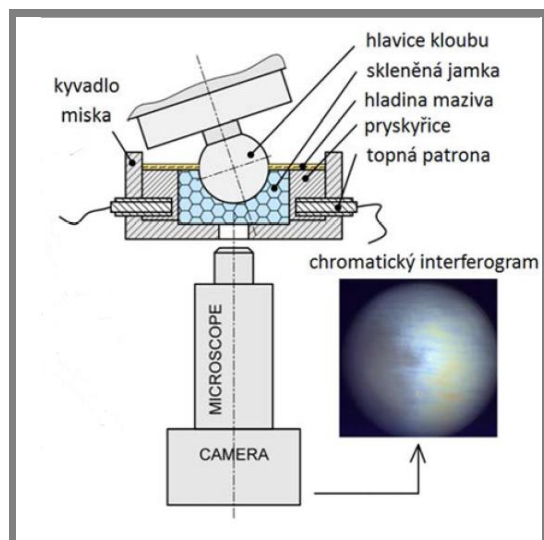


Obr. 2-17 Zaťažovací cyklus [19]

2.4 Optická interferometria

Veľmi významnou metódou pre skúmanie mazacieho filmu je metóda optickej interferometrie. Používaná je bežne pri meraní mazacieho filmu medzi nekonformnými povrchmi. Veľmi často sú to oceľové guľôčky a sklenený disk. Táto metóda nebola pôvodne optimalizovaná a mala nedostatky. Lepšie výsledky sa podarilo dosiahnuť zlepšením optických vlastností jednotlivých komponentov, cez ktoré prechádzajú svetelné lúče. Hartl a kol. publikovali ich optimalizovanie pre

štúdium tenkých mazacích filmov [10]. Publikácia popisuje celé riešenie. Je v nej použitý optický mikroskop s vysokorýchlostnou kamerou. Výstupom metódy optickej interferometrie je interferogram sústavy kruhov. Z ich pozícií a jednotlivých amplitúd je potom možné získať priebeh hrúbky maziva cez interferogram.

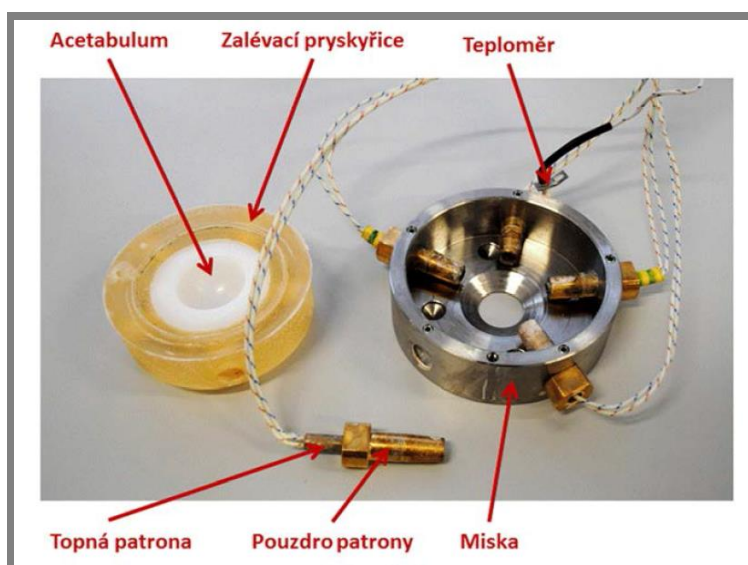


Obr. 2-18 Schéma pozorovania interferometrie [11]

2.4.1 Acetábulum

2.4.1

Vylepšenie terajšieho kývavého simulátora priniesol Ústavu konštruovania aj vytvorenie vhodného acetábula, ktoré bolo vytvorené Ing. Filipom Urbanom v rámci diplomovej práce [11]. V záverečnej práci vytvoril nový návrh acetábula. Kde rozšíril kĺbovú náhradu o možnosti temperovania. Taktiež bol simulátor rozšírený o možnosť pozorovania kontaktnej oblasti upravenej kĺbovej náhrady metódou kalorimetrické interferometrie. Tento variant acetábula bol osvedčený pri užívaní Ústavom konštruovania. Z tohto dôvodu by mohol byť použitý aj v novovytvorenom návrhu bedrového simulátora.



Obr. 2-19 Acetabulová kĺbová jamka [11]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIELE PRÁCE

Prostredníctvom doterajších znalostí a získaných poznatkov zo štúdií by mal byť konštruovaný simulátor lepším variantom z doteraz publikovaných. Mal by byť s použitím metódy vhodnej na pozorovanie mazacieho filmu v bedrovom kĺbe za pomoci mikroskopu a vysokorýchlostnej kamery. Postup je na Ústave konštruovania veľmi podrobne osvedčený, ako ukázali štúdie publikované príslušným ústavom. Z predošlých výskumov bolo zistené, že vo väčšine simulátorov bedrového kĺbu bolo použité simulovanie iba pohybu kĺbu FE.

Simulátory realizujú zaťaženie pomocou hydraulického, pneumatického mechanizmu, pomocou servomotorov a lineárneho posunutia alebo pomocou pák. Vyvolanie zaťaženia cez hydraulický alebo pneumatický mechanizmus má výhody v meraní veľkosti zaťaženia a to napríklad pomocou manometra, kde výhodou je predovšetkým cena. Nevýhodou je vybavenie, potrebné ku chodu mechanizmu. Súčasne nastáva nebezpečenstvo úniku pracovného média z obvodu. Pri používaní konštrukčného riešenia pri zaťažení pomocou servomotorov a lineárnych posunov je vo veľkom množstve prípadov výhodnejšie ako pneumatický alebo hydraulický systém. Nevýhodou je cena presnej výroby a taktiež údržba týchto systémov. Z týchto všetkých variant je najlepšou voľbou pneumatické riadenie. To umožňuje rýchlu zmenu sily regulovanú proporcionálnym ventilom rovnako ako v simulátore FIME II.

Kvôli použitiu vysoko rýchlostnej kamery budú musieť byť návrhy spomínaného simulátora podobné ako pri zariadení PLINT. V simulátore sa už nachádza podobný princíp, ktorý je uplatnený a používaný. No zaťaženie, ktoré tento simulátor dokáže vyvolať nie je dostatočujúce navrhovanému simulátoru. Lacnejším variantom pri použití väčšej sily bude využitie mechanizmu pružín prípadne vačiek. No tieto varianty, ako bolo opísané vyššie, by neposkytovali dobrú reguláciu premeny zaťaženia a zmeny frekvencie kmitu v kĺbovom spoji. Preto by bolo vhodnejšie použiť zaťažovací systém zo simulátora FIME II. Zo štúdií bolo pozorované zaťažovanie vyvolané do výšky až 4000 N. Taktiež uloženie hlavice môže byť použité zo simulátora z Helsink, kde bola použitá kompenzačná úložná hlavica pre odstránenie vyosenia pozorovanej hlavice.

Kontakt v kĺbovom spoji bude riešený za použitia už vyrobeného upraveného acetábula od Ing. Filipa Urbana [11], ktorý takto upravené acetábulum upravoval pre kývavý mechanizmus súčasného simulátora.

3.1 Ciele práce a rozsah autorovej práce

Cieľom tejto práce je konštrukčný návrh experimentálneho zariadenia bedrového kĺbu s premennou záťažou pre analýzu hrúbky mazacieho filmu a opotrebenie v umelých bedrových náhradách. Zariadenie má spĺňať požiadavky stanovené normou ISO 14242 [4]. Simulátor bude mať dynamicky riadené zaťaženie a frekvenciu kmitu zo simulovaním hlavného pohybu bedrového kĺbu flexia - extenzia. Práca má za podstatu vylepšiť a zdokonaľiť doterajší variant simulátora bedrového kĺbu, akým je kyvadlový simulátor. V ňom nie je možné meniť frekvenciu kývania simulátora a taktiež nie je uskutočniteľné meniť záťaž počas kývania simulátora.

Predložená diplomová práca bola súčasťou inžinierskeho projektu, ktorý bol riešený v rámci tímu. Autor predloženej práce zodpovedá za riešenie nasledujúcich častí:

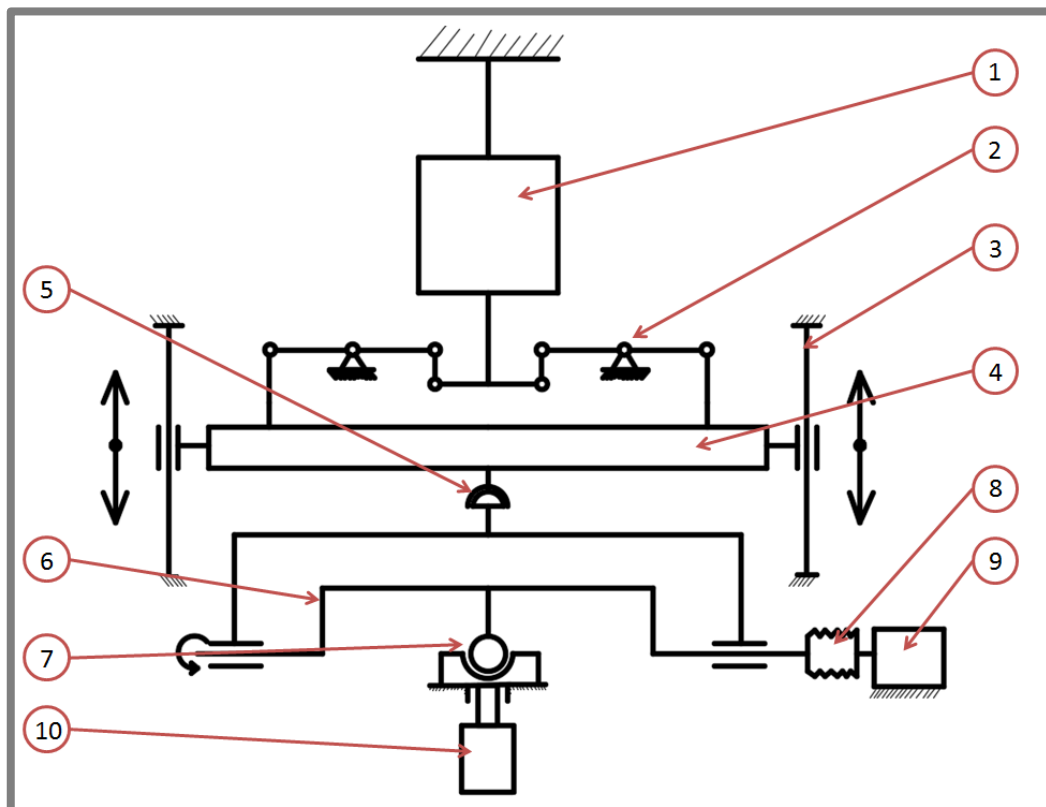
- tvorba rešeršnej časti,
- tvorba prvej konštrukčnej varianty zariadenia,
- návrh nasledujúcich častí: kamerový rám, pohon s prevodovkou a jeho napojenie, tvar a návrh kývavého rámu, mechanizmus zachytenie excentricity kĺbového spoja,
- pevnostné výpočty a 90 % z výkresovej dokumentácie všetkých častí vrátane hlavného výkresu zostavy,
- zaistenie výroby všetkých obrábaných dielov,
- montáž zariadenia a optimalizácia nevhodne navrhnutých dielov,
- schéma zapojenia pneumatického systému,
- schéma zapojenia a realizácia celej elektroinštalácie,
- optimalizácia zdrojového kódu naprogramovaný firmou FESTO,
- vytvorenie programu pre záznam nameraných veličín v programe LabView,
- prevedenie úvodného merania,

4 KONCEPČNÉ RIEŠENIA

Súčasný konštrukčný návrh kývavého zariadenia je obmedzený svojimi kinematickými a mechanickými vlastnosťami. Rekonštrukcia tohto zariadenia by bola náročná hlavne z kinematiky kývania a tvorby prídavných zotrvačných síl zariadenia. Bola preto navrhnutá nová konštrukcia zariadenia v rôznych variantoch.

4.1 Prvý variant

Tento variant má základný návrh z už navrhnutého simulátora FIME II, ktorý bol spomenutý v kapitole Prehľad súčasného stavu poznania. Vo variante je použitý pneumatický sval (1), ktorý kvôli svojej mechanike vytvára najväčšiu silu, keď je v podtlakovej polohe. Kvôli tomu je použitý systém pákových mechanizmov (2), ktoré konvertujú tlak na ťah. Následne je použité lineárne vedenie (3), umožňujúce výmenu nástrojov a taktiež prispôsobenie danému kĺbovému spojeniu. Za týmto lineárnym vedením je použitý tenzometer (5) od firmy HBM s označením C2, ktorý svojim kĺbovým prevedením dokáže zaznamenávať silu, ktorá môže byť aj mierne vyosená. Vzniknúť môže to, aby sa simulátor prispôbil excentricite kĺbovej dvojice. Tá vzniká prirodzene v kĺbovom spojení. Je to podobný princíp ako majú simulátory z Technickej univerzity v Helsinkách alebo trojosové simulátory. Tenzometer je napojený na rám (4), v ktorom je umiestnený kývavý hriadeľ (6). Spomínaný hriadeľ je prepojený s motorom (9) pomocou vlnovkového spojenia (8), z dôvodu pohybu sústavy. V kývavom hriadeli je vložený trň s kĺbovou hlaviceou (7), ktorý je vsadený do kĺbovej jamky. Tá je zaliata v acetábuli. Acetábulum je pevne pripevnené zo základnou platňou rámu tohto zariadenia s pevne pripevneným kamerovým systémom (10).



Obr. 4-1 Schéma prvého variantu

Výhody:

- Pri spomínanom návrhu je zaistené veľmi efektívne prispôsobenie sa kĺbovej excentricite prostredníctvom pomocného kĺbového spojenia, ktoré slúži ako spätná väzba pre vyvodenú silu.
- Použitie tuhého upevnenia acetábulom, v ktorom nemôžu vznikať nežiaduce vibrácie, spôsobujúce rozmazávanie obrazu hrúbky mazacieho filmu.

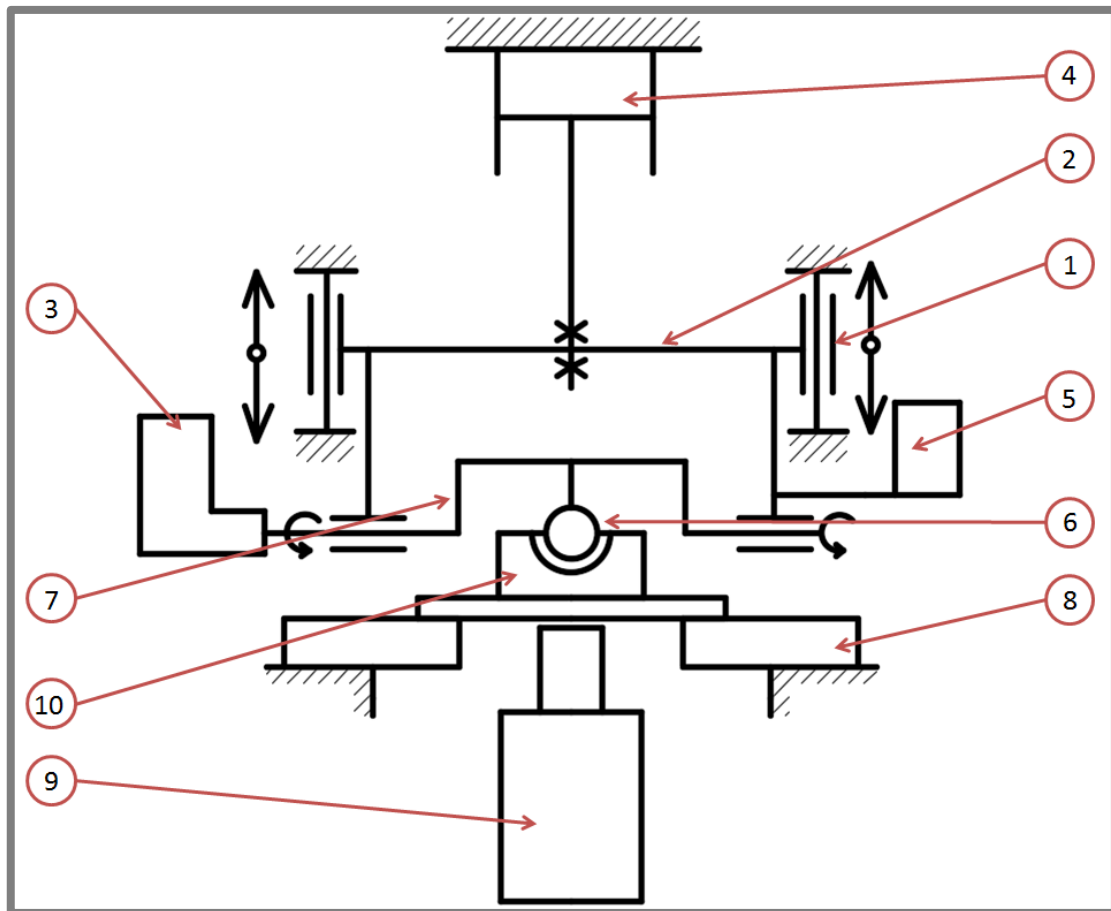
Nevýhody:

- Aplikovanie pevne pripevneného motora, kde bude potrebné neustále odpájanie vlnovkovej spojky s pohybujúcou súčasťou.
- Použitie veľmi komplikovaného pákového spojenia.
- Využitie tenzometerov má z dôvodu kĺbového spojenia dve časti, ktoré nie sú pevne spojené. Mohla by nastať v tomto prípade nežiaduca kolízia pri návrhu výmeny prípadne samotného chodu stroja.
- Životnosť pneumatického svalu je pri veľmi malých pretvoreniach obmedzená.

4.2 Druhý variant

4.2

Druhý variant disponuje podobným princípom ako predchádzajúci. Odlišnosťou je mechanizmus záťaže, kde pneumatický sval bol nahradený pneumatickým valcom (4), ktorý následne odstránil pákový mechanizmus. Zároveň aj pevné zaistenie motora (3) bolo nahradené voľným uložením motora. Pripevnený je na pohybujúcom sa ráme a vyvažovaný pomocou pripevneného protizávažia (5). Posledným rozdielom je nahradenie tenzometra C2 typom HLCB (8). Opisovaný ohybový tenzometer je umiestnený pod acetábulom (10). Acetábulum je položené na tenzometroch v ktorých sú vložené gumové krúžky, pomáhajúce zachytávať excentricitu kĺbového spoja. Optická aparatúra (9) je pevne umiestnená k hlavnému konštrukčnému rámu.



Obr. 4-2 Schéma druhého variantu

Výhody:

- Dlhšia životnosť pneumatického valca oproti použitému pneumatickému svalu.
- Zložitý pákový mechanizmus je nahradený priamym spojením s pneumatickým valcom.
- Odstránené pevné upevnenie motora.
- Použitím tenzometrov typu HLCB je odstránená možnosť vyskytnutia sa kolízií mechanizmu.

Nevýhody:

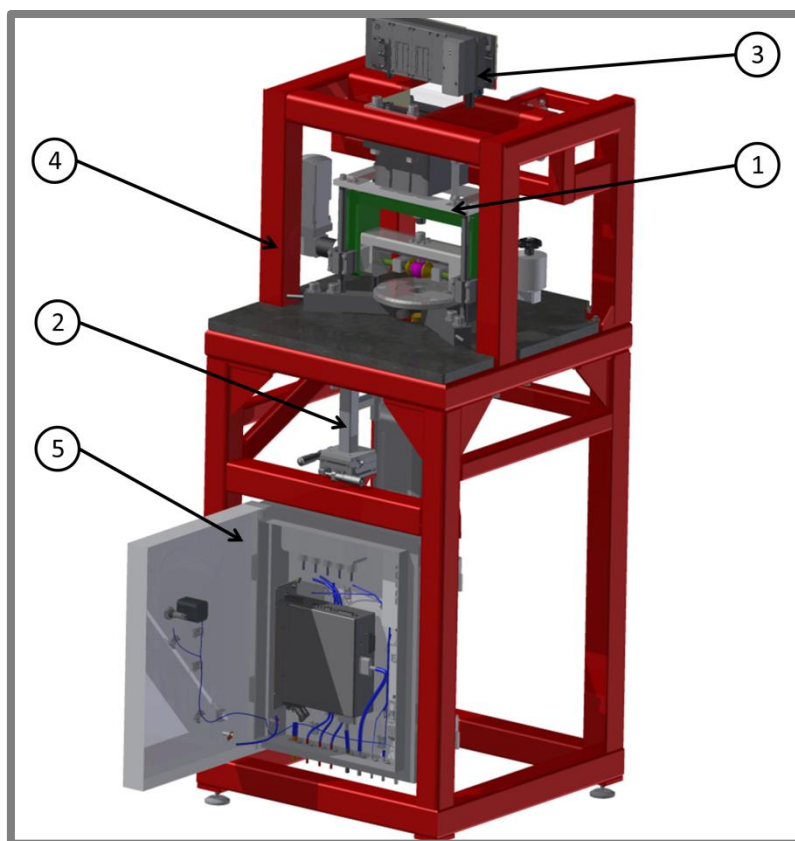
- Možný výskyt rozostrenia snímaného obrazu.

4.3 Zvolený variant

Vybraný bol druhý variant z dôvodu uvedených výhod a nevýhod danej možnosti. Pričom vybraný variant má nevýhodu rozostrenia snímaného obrazu. Rozostrenie sa však dá eliminovať a nastaviť priehyb vybraním správnym tenzometrom, tak aby sme boli na takej úrovni, akú požaduje obraz pri pozorovaní hrúbky mazacieho filmu pomocou metódy interferometrie.

5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

V predchádzajúcej kapitole bol vybraný finálny variant, ktorý bude následne podrobne rozpísaný. Celé zariadenie je rozdelené do piatich základných častí. Medzi nich patrí najkomplikovanejšia, ale aj najdôležitejšia časť stroja - vrchná mechanická časť (1). V tejto sekcii sa nachádzajú ložiská, motor, prevodovka, hriadele a iné. Spodná mechanická časť (2) obsahuje optickú aparatúru a všetko okolo nej. V tretej časti s názvom Pneumatický systém a PLC riadiaca jednotka (3) je popísaná riadiaca jednotka a rozvod vzduchového média do systému. Štvrtá časť obsahuje popis rámovej konštrukcie (4). Posledná konštrukčná časť zahŕňa rozvodovú skriňu (5). V tejto kapitole sa opisuje celá elektroinštalácia simulátora od frekvenčného meniča až po hlavné vypínacie tlačidlo. Po opise konštrukčnej časti zariadenia nasleduje samotná cenová rozvaha celej diplomovej práce. V poslednej časti je opísané samotné úvodné testovacie meranie, ktoré sa uskutočnilo na zhotovenom simulátore. V kapitole Konštrukčné riešenie je detailne popísaná príprava, postup a samotný výsledok tohto merania.



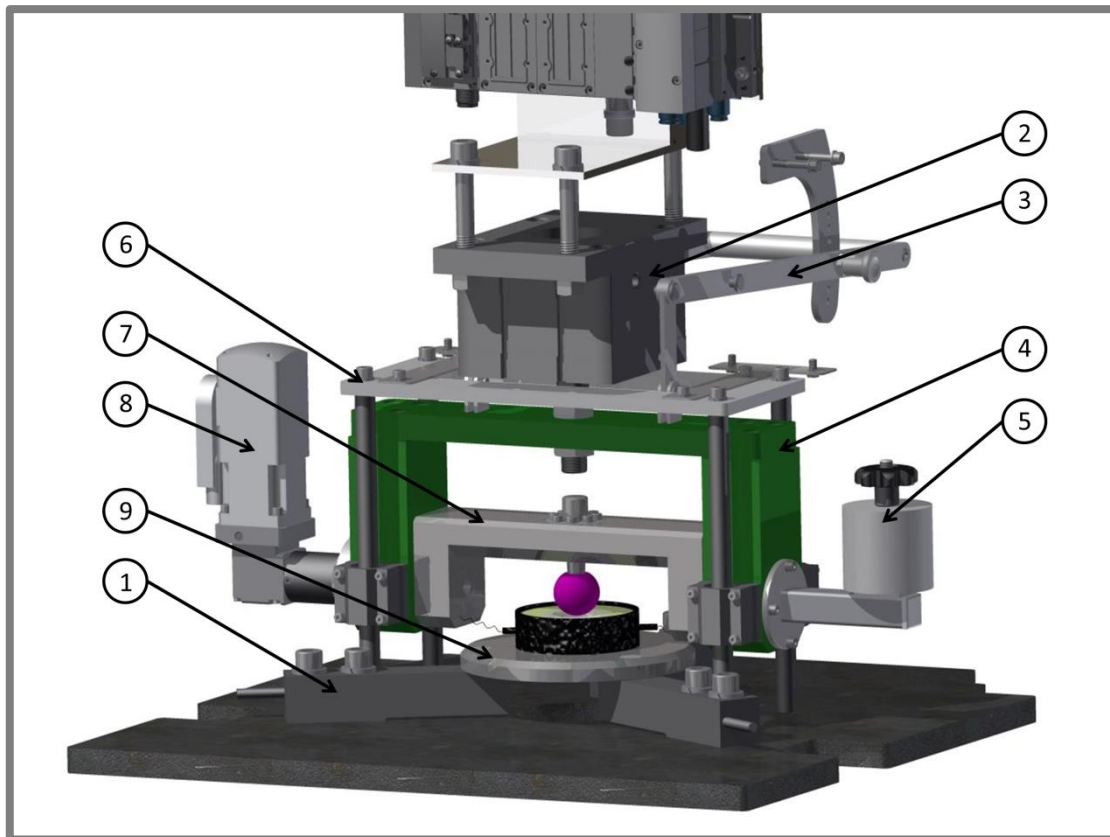
Obr. 5-1 3D vizualizácia zariadenia [17]

5.1 Vrchná mechanická časť

5.1

V tejto kapitole je opísaná celá vrchná mechanická časť simulátora bedrového kĺbu. V prvom rade sa vyberú potrebné komponenty, ktorými sú pneumatický valec (2) a meracie členy. Následne bude opísaná hlavná časť zariadenia, ktorou je kývavý (7) a posuvný rám (4), ktoré sú upevnené na lineárom vedení (6). Na tento rám je napojený motor s prevodovkou (8), kde na opačnej strane je vyvážený pomocou protizávažia (5). Nasleduje opis acetábulovej platne (9), pripevnenej na samotných

tenzometroch (1). V poslednom rade sa bude opisovať samotná výmena kĺbovej hlavice a jamky, prostredníctvom pákového mechanizmu (3), ako aj ich ustálenie do osi rotácie vzhľadom ku kývavému hriadeľu.



Obr. 5-2 Zaťažovací cyklus [17]

Pneumatický valec je prepojený s posuvným rámom cez dve matice, zabezpečujúce ľahkú demontáž a taktiež dostatočné spojenie. Pneumatický valec je zvrchu pripevnený k rámovej konštrukcii pomocou príruby a skrutkových spojov. Posuvný rám je pripevnený na lineárnych domčekoch, umožňujúcich zvislý lineárny posun. Domčeky sú vložené v lineárnych tyčiach, ktoré sú zašraubované k základovej doske. V posuvnom ráme je vložený v ložiskách kývavý hriadeľ. Naňho je napojený motor s prevodovkou a samotný trň s kĺbovou hlaviceou. Kĺbové spojenie je prepojené do acetábula, zaliateho v miske spolu s kĺbovou jamkou. Miska je pripevnená skrutkovým spojom k platni acetábula. Táto platňa je následne položená na ohybových tenzometroch. Tenzometre sú pevne pripevnené k základovej platni prostredníctvom skrutiek. Lineárne tyče sú prepojené s platňou. Tá je upevnená k rámovej konštrukcii pomocou tenkých plechov tvaru T.

5.1.1 Pneumatický valec

Je potrebné, aby pneumatický valec zvládol rýchlu premenu sily. Tento faktor nie je ovplyvnený pneumatickým valcom, ale proporcionálny ventilom. Jedine tento ventil, ktorý dokáže vniesť do valca potrebné množstvo vzduchu v daných časových intervaloch s požadovanou rýchlosťou. Spomínaný proporcionálny ventil je riadený pomocou PLC jednotky.

Navrhnutý proporcionálny ventil VPPM-6TA-L-1-F-0L6H-S1 od firmy FESTO, má vo svojich špecifikáciách udanú zmenu tlaku z 0-6 barov za 101 ms. Táto hranica je v poriadku, keďže podľa normy musí byť priebeh do 120 ms. Avšak z 6-0 barov dokáže vyfúknuť vzduch za 237 ms, čo už by nespĺňalo normu. Preto bolo navrhnuté riešenie, kde pracovný tlak by bol znížený na polovicu a to na 3 bar. Tým by sa dosiahli teoreticky polovičné časy, ktoré by boli 50,5 ms/ 118,5 ms. Tieto hodnoty sú však iba teoretické, ale ak sa vezmú do úvahy zaťažujúca sila podľa normy, môže byť odchýlka sily až o 3 %. To činí rozdiel až 90 N. Preto je možné tvrdiť, že vybraný proporcionálny ventil bude vyhovovať norme. Po vhodnom vybraní proporcionálneho ventilu je potrebné vybrať pneumatický valec, dokazujúci pri tlaku 3 bary vyvinúť silu odpovedajúcu norme 3000 N. Pre túto konfiguráciu bol vybratý valec s označením ADN-125-5-A-P-A-40K2-K8 od firmy FESTO. Vybraný valec má priemer 125 mm, maximálny zdvih 5 mm a má predĺženú piestnicu pre uchopenie pohyblivého rámu. Maximálnu teoretickú silu pri 6 baroch má 7363 N, čo je pri polovičnom tlaku cez 3000 N.



Obr. 5-3 Pneumatický valec

5.1.2 Temzometre

5.1.2

Spätná väzba pre proporcionálny ventil ako aj meranie veľkosti záťaže vyvinutá pneumatickým valcom bude nameraná hodnota z tenzometrov. Rovinu môžeme definovať tromi bodmi. Preto boli použité až tri ohybové tenzometre, ktoré tak definujú rovinu plochy.

Pre výber tenzometrov bolo podstatné si najprv stanoviť základné parametre. Keďže tieto tenzometre budú použité aj pri pozorovaní vysokorýchlostnou kamerou, je preto dôležitým faktorom veľkosť priehybu týchto tenzometrov. Preto bol urobený výpočet ostrosti optickej aparatúry, stanovujúci krajné hodnoty.

Vzorec pre výpočet ostrosti [15]:

$$\Delta z = \frac{2w_{PLX}}{mA} = \frac{2 \cdot 4,2918 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 0,1} = 2,14 \cdot 10^{-5} m = 0,0214 mm$$

kde:

w_{PLX}	m	šírka pixlu stanovená optikou kamery
m	-	zväčšenie obrazu stanovené z mikroskopu
A	-	pracovná zostava určená z optiky mikroskopu

Z vyššie uvedeného výpočtu vieme určiť maximálne dovolený ohyb, pri ktorom je možné tvrdiť, že obraz je stále dostatočne zaostrený. Avšak jedná sa o pozorovanie pomocou interferometrie, pri ktorej nie je až tak dôležitá ostrosť obrazu, ako určenie farby tvoriacich sa vrstiev. Hranicu je možné posunúť až štvornásobne, kde pri tomto posune bude obraz jemne rozmazaný avšak bude možné vyčítať z obrazu dôležitú farebnú škálu.

Navrhnuté sú preto tenzometre typu HLCB2C3 od firmy HBM. Tento typ tenzometrov má dovolenú maximálnu záťaž až 2,2 tony, u ktorých sa snímač dokáže ohnúť až o 0,5 mm. Vytvorí sa pôsobenie na snímač definovanou silou 3000N, ktorá sa následne rozloží do troch snímačov. Výsledná maximálna pôsobiaca sila bude 1000 N na jeden snímač. Ten sa pri danej záťaži ohne iba o 0,02 mm. Tenzometre dôjdu na hranicu ostrosti optickej aparatúry, kde na konštrukčný rám pri maximálnej sile pripadá 0,06 mm. Taktiež boli vybrané typy tenzometrov z dôvodu presnosti, kde tolerancia vyplývajúca z charakteristiky tohto tenzometru pri senzitivite 1,94 mV/V pri prípustnej tolerancii 0,01 % s presnosťou v rozsahu $\pm 0,00194V$.



Obr. 5-4 Zaťažovací cyklus [20]

K týmto ohybovým tenzometrom bude potrebné zakúpiť zariadenie na zosilnenie signálu z dôvodu predimenzovania, ako aj zariadenie na zlučovanie hodnôt z jednotlivých tenzometrov. Bolo teda navrhnuté zosilňovacie zariadenie typu AE301. Tolerancia zo zariadenia je rovnaká, ako tolerancia tenzometrov, kde tolerovaná hodnota je v rozsahu 0,001 V. Pri konfigurácii je možné docielenie veľkostí kroku 1 N. Táto tolerancia je vyhovujúca, keďže v ISO norme je definovaná odchýlka pri záťaži $\pm 3\%$, čo pri maximálnej záťaži predstavuje až 90 N. Na zlúčenie troch použitých tenzometrov bude potrebné zakúpiť zariadenie VKK1-4, ktoré dokáže zlúčiť tri tenzometre, kde výstupom je jedna hodnota.



Obr. 5-5 Frekvenčný zosilňovač [20]



Obr. 5-6 Zlučovač tenzometrov [20]

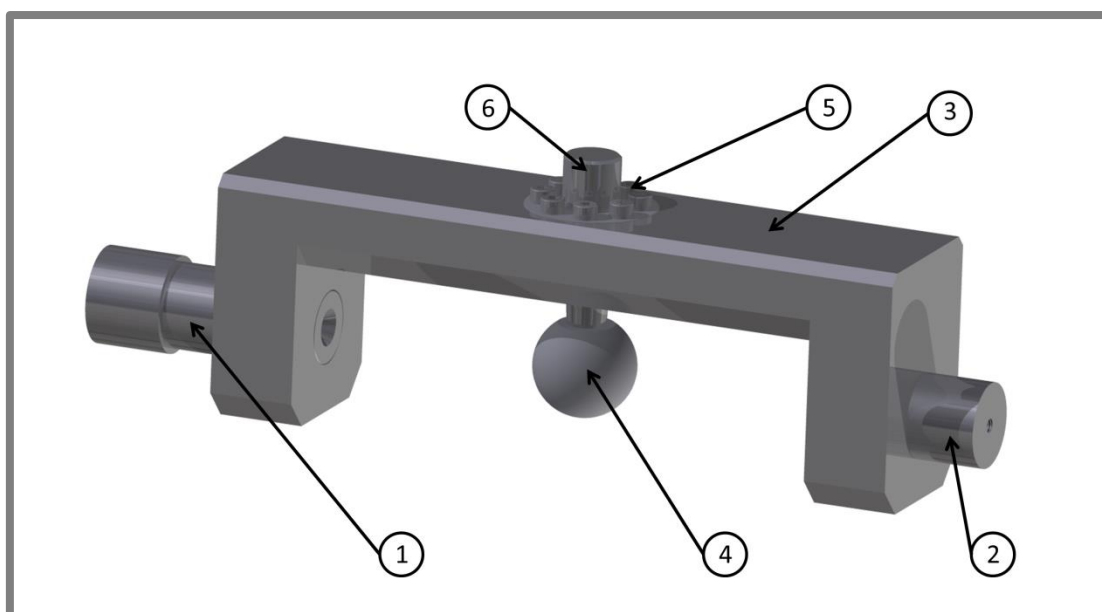
5.1.3 Kývavý a posuvný rám

5.1.3

Tieto dve časti sú vyrobené z nehrdzavejúcej oceli. Hlavným dôvodom je ručná manipulácia. Bola navrhovaná z nerezovej oceli s označením EN 1,4301. Dôvodom je vynikajúca odolnosť proti korózií v prirodzenom prostredí. Disponuje dobrou zvárateľnosťou aj bez prídavného kovu. Tepelné úpravy po zváraní nie sú nutné.

Kývavý hriadeľ

Tento hriadeľ je hlavnou časťou zariadenia. Prenáša do acetábula kývanie z motora a záťaž z pneumatického valca. Skladá sa z nasledujúcich častí: pravý (2) a ľavý (1) nalisovaný hriadeľ, hlavná stredná časť (3), trň (6) vložený vo svornom puzdre (5) a klbovej hlavice (4).



Obr. 5-7 Kývavý hriadeľ

Hlavný vplyv na hriadeľ má jeho spojenie s prevodovkou motora. Na výber boli dve varianty zakončenia hriadele prevodovky. Prvý variant bol prostredníctvom perového uloženia. Toto uloženie je jednoducho rozoberateľné a ľahko montovateľné, avšak pri aplikácii rýchlej zmeny smeru má negatívny dopad na presnosť odrážajúcej sa pri zmene smeru. Pri zmene smeru vznikajú spätné nárazy v ráme a tým aj určité oneskorenia. Druhou možnosťou bolo hladké zakončenie hriadeľa. Pri tomto variante

je potrebný určitý typ svorného puzdra, ktoré bude mať vstup pre hriadeľ veľkosti $\varnothing 11$ mm a dokáže preniesť krútiaci moment o veľkosti 20 Nm. Prvým variantom bolo svorné puzdro s dvoma skrutkami. Avšak výpočtom bolo zistené, žeby musela byť použitá skrutka M8, čo však nie je možné použiť pre obmedzený priestor. Výpočet bol nasledujúci. Vstupné parametre priemeru hriadeľa (d) 11 mm, dĺžka puzdra (l) 15 mm súčiniteľ trenia (f) 0,1, prenášaný krútiaci moment (M_k) 20 Nm, bezpečnosť (k_s) 2, počet skrutiek (n) 2.

Osová sila skrutky:

$$F_o = \frac{2 \cdot k_s \cdot M_k}{\pi \cdot n \cdot f \cdot d} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 20}{\pi \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 0,011} = 11574,9 \text{ N}$$

a pri kontrole na odtlačenie

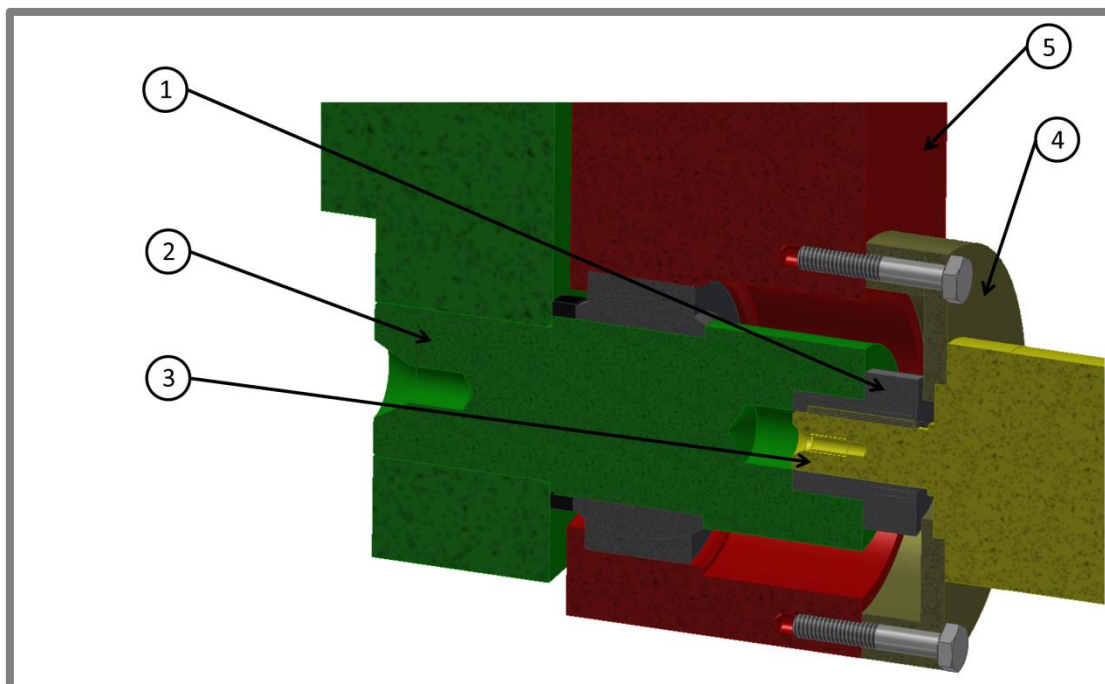
$$p > \frac{n \cdot F_o}{d \cdot l} \Rightarrow p > \frac{2 \cdot 11574,9}{0,011 \cdot 0,015} = 140301878 \text{ Pa}$$

z čoho plynie, že musí byť použitá skrutka M8 a vyššie. Preto bol vybraný druhý variant, kde bolo použité svorné puzdro od firmy MISUMI s označením MLN10.



Obr. 5-8 Svorné puzdro [21]

Toto svorné spojenie je pre svoju veľkosť a silu prenášaného krútiaceho momentu ideálnou časťou pre použitie. Výrobca udáva, že pri utiahnutí 40 Nm je zaručené preniesť krútiaci moment o veľkosti 20 Nm. Na obrázku nižšie je možné vidieť rez, v ktorom je vloženie tohto svorného spojenia do zostavy. Svorné puzdro (1) je napojené na prevodovku (3) a vložené do kývavého hriadeľa (2). Celé je to spojené s posuvným rámom (5) pomocou zloženej príruby (4).



Obr. 5-9 Detail na prepojenie prevodovky s hriadeľom

Dopad na geometriu a tvar navrhovaného rámu malo aj použitie ložísk. Boli použité kĺbové ložiská, ktoré sa používajú hlavne pri kývavom pohybe hriadeľov a ktoré boli doporučené firmou SKF pre uvedený typ aplikovania.

Kĺbové ložisko bolo vypočítané pri záťaži 1500 N v radiálnom smere. Na stránke www.skf.com bolo vybrané ložisko s označením GE 30C. Web taktiež ponúka výpočet životnosti vybraného ložiska. Zadané vstupné parametre sú: radiálne zaťaženie 1500 N, axiálne zaťaženie 0 N, teplota 20°C, polovičný uhol kývania 21,5°, typ záťaže je dynamický a to v rozsahu 0,5 – 5Hz a frekvencií otáčania 14,3 min⁻¹.

Frekvencia otáčania bola vypočítaná následne:

Celkový uhol otáčania má byť 25° z jednej strany a 18° z druhej strany. Stanovený je normou ISO, kde celý jeden proces má trvať 1 sekundu. Z čoho vyplýva, že 21,5° je vykonané za 0,25 sekúnd. Na jednu otáčku pripadá:

$$\frac{360^\circ \cdot 0,25 \text{ s}}{21,5^\circ} = 4,186 \text{ s}$$

teda jedna otáčka trvá 4,186 sekúnd. Z toho môžeme stanoviť počet otáčok za jednu minútu:

$$\frac{1 \text{ ot} \cdot 60 \text{ s}}{4,186 \text{ s}} = 14,33 \text{ otáčok}$$

Po zadaní vstupných parametrov do aplikácií, bola vypočítaná základná životnosť ložiska **13 100 hodín**, čo predstavuje približne **1,5 roka** pri neustálom chode a pri najväčšej záťaži.

Basic rating life for spherical plain bearings and rod ends : GE 30 C

Input parameters

F_r Radial load	1.500 kN
F_a Axial load	0 kN
Operating temperature	20 °C
β Half the angle of oscillation	21.5 °
Type of Load	Alternating direction load 0.5 Hz - 5 Hz
f Frequency of oscillation or rotational speed	14.3 min ⁻¹
t Time taken to pass through complete oscillation (4 β)	4.196 s

Message

[pv diagram, operating ranges](#)

Result

G_h Basic rating life	13100 hour
G Basic rating life	11234000 oscillations

Intermediate Results:

F_a/F_r	0	γ	1
P	1.5 kN	K	100 N/mm ²
p	2.29 N/mm ²	d_m	40.7 mm
v	0.00728 m/s	b_1	0.2
b_2	1	K_M	1400

bearings and rod ends

Remove

Bearing data

Designation GE 30 C
d 30 mm
D 47 mm
B 22 mm
C 65.5 kN
C₀ 166 kN
d_k 40.7 mm
Type Spherical plain bearing

[View bearing details](#)

Obr. 5-10 Výpočtové parametre ložiska [22]



Obr. 5-11 Kĺbové ložisko [23]

Je potrebné, aby bol tŕň pre kĺbovú hlavicu polohovateľný pri výmene priemeru hlavice. Je nutné polohovanie. Zároveň je veľmi dôležité dostatočné upevnenie, aby pri maximálnej pôsobiacej sile 3000 N nedošlo k uvoľneniu tŕňa. Preto je upevnenie na hriadeli zaistené pomocou svorného puzdra typu: TLK 200 s vnútorným priemerom 20 mm.



Obr. 5-12 Svorné púzdro [24]

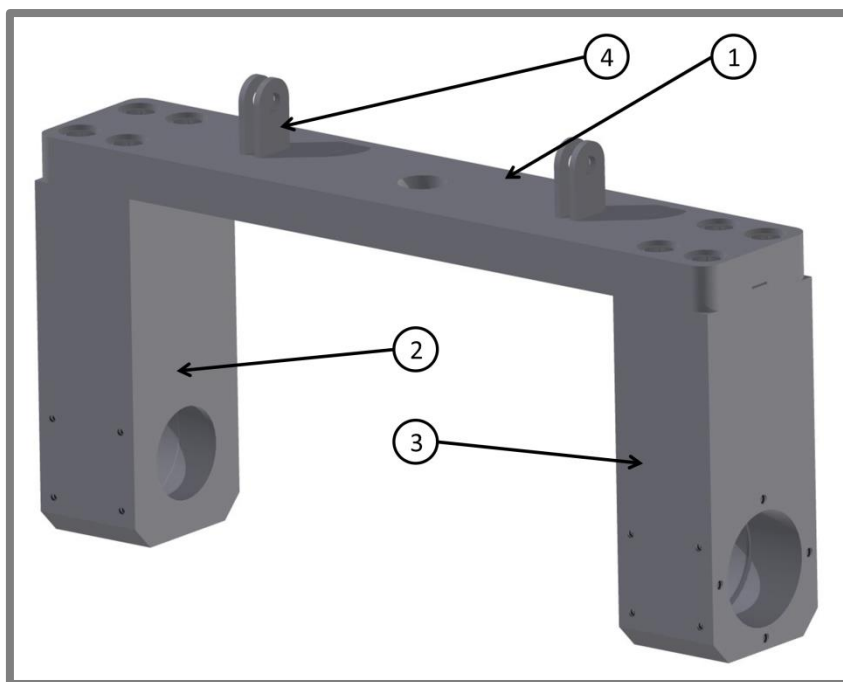
Svorné púzdro zaisťuje upevnenie pomocou postupného sťahovania vnútornej časti a to za pomoci skrutiek. Daný typ svorného puzdra zaisťuje maximálnu dovolenú silu pôsobiacu na hriadeľ v radiálnom smere o veľkosti 29 kN, čo je postačujúce. Pre použitie ložiska a svorných puzdier je nutné, aby sa kývavý hriadeľ skladal z troch častí, kvôli samotnej konštrukcii stroja. Montáž bude prebiehať nasledujúcimi krokmi:

1. Nalisovanie kĺbových ložísk do hriadeľov kývavého rámu.
2. Nalisovanie kĺbového ložiska s hriadeľom do domčeka.
3. Nalisovanie domčeka s kĺbovým ložiskom a hriadeľom do prostrednej časti kývavého rámu.

Kĺbové hlavice, ktoré budú používané na zariadení sú: 26 mm, 28 mm, 32 mm, 36 mm. K nim prislúchajú, umelé, keramické, kovové a sklené kĺbové jamky.

Posuvný rám

Z dôvodu montáže bol navrhnutý posuvný rám z troch častí. Dva ložiskové domčeky (2,3) sú pripevnené na vrchnej platni (1). Na nej sú privárané štyri očká (4) kvôli upevneniu pákového mechanizmu.



Obr. 5-13 Posuvný rám

Rám je zaťažovaný pomocou pneumatického valca, preto má tento rám vyhradený pohyb, ktorý mu zabezpečuje lineárne vedenie. Lineárne vedenie je nakupované od firmy MISUMI. Nakupované sú diely lineárne domčeky a lineárne tyče. Lineárne domčeky boli zvolené na základe šírky rámu a priemeru lineárnym tyčiam. Pri samotnom zaťažovaní nebude dané pretvorenie viditeľné, avšak výmena acetábula spolu s hlavicom už má vplyv na dĺžku tyčí. Ich dĺžka bola stanovená na základe vymodelovania návrhu a výpočtu výmeny kĺbovej hlavy a acetábula, ktoré bude podrobnejšie popísané nižšie. Z výpočtov bola následne stanovená dĺžka tyčí 250 mm. Priemer bol definovaný na 16 mm. Nakupované diely sú:

lineárne tyče: VSFJW16-250,

lineárne domčeky: LHBBF16.

Pevnostná analýza posuvného rámu a kývavého hriadeľa

Po stanovení a navrhnutí rozmerov celého posuvného mechanizmu bol vymodelovaný a prepočítaný cez program ANSYS Workbench. Simulovaná bola krajná a najkritickejšia situácia, ktorá mohla v tomto systéme nastať. Najkritickejšou situáciu je naklonenie kývavého rámu pod uhlom 25° od stredu rámu s pôsobiacou silou 3000 N. Okrajové hodnoty sú stanovené normou.

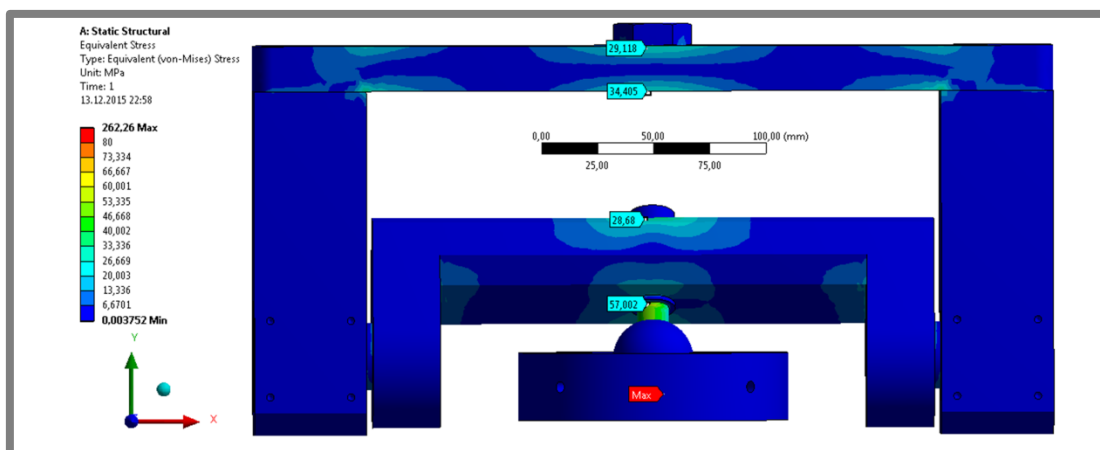
Popis základných parametrov simulácie

Použitými materiálmi simulovanej zostavy sú konštrukčná oceľ a nehrdzavejúca oceľ. Celá zostava je kvôli jednoduchšiemu výpočtu spojená väzbou zváraná (bonded). Spojenie medzi kĺbovou hlavicom a kĺbovou jamkou je použité zjednodušenie voči realite a to za použitia väzby „Frictionless“. Keďže nie je použiteľná väzba „bonded“, lebo by bola simulovaná iná mechanická závislosť, ako je požadovaná.

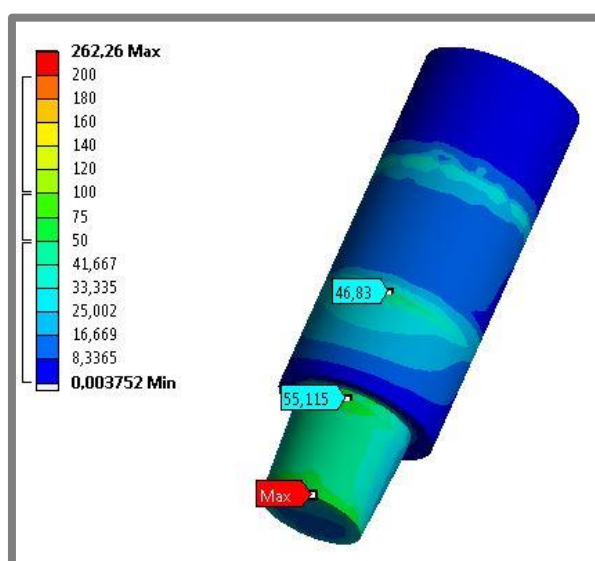
Taktiež do výpočtu nie sú použité lineárne domčeky a tyče kvôli veľmi komplikovanému výpočtu. Tieto komponenty sú preto nahradené väzbou „posuvná“. Z nej sú odobraté posuny v X a Z smere. Ďalšou základnou definovanou podmienkou je, že miska acetábula má spodnú časť definovanú ako pevnú s odobratím všetkých stupňov voľnosti. Sila je definovaná na vnútornú časť skrutky, kde smer sily je kolmo nadlom s veľkosťou až 3500 N. Zanedbaná je gravitačná sila z dôvodu komplikovanosti výpočtu a v konečnom dôsledku nebude mať veľký dopad na výsledok.

Veľkosť elementov je definovaný na každej časti zvlášť a to od 8-2 mm. Celkový počet elementov je 217 647 a celkový počet uzlov 351 417. V prílohe 4 **Analýza kývavého a posuvného rámu** je vyobrazená sieť a okrajové podmienky simulácie.

Vytvorený bol výpočet pre napäťovú analýzu. Z nej sa zistilo, že najkritickejšie miesto je na okrajoch tŕňu kĺbovej hlavy. Hodnota tŕňu dosahovala maximálne 70 MPa. Použitá je nehrdzavejúca oceľ a medza sklzu má definovanú hodnotu 220 MPa. Z čoho môžeme vypočítať bezpečnosť, ktorá je 3.



Obr. 5-14 Výsledná analýza posuvného rámu



Obr. 5-15 Detail na kritickú časť tŕňa

5.1.4

5.1.4 Motor s prevodovkou

Z dôvodu, že motor je pripevnený iba na rámovej konštrukcii, ktorá sa pohybuje, tak bolo potrebné vybrať ľahký motor, ktorý by dokázal vyvinúť dostatočne veľký krútiaci moment.

Vstupné parametre pre výpočet sily motora sú: Maximálna zaťažovacia sila (F_{max}) je 3000 N, súčiniteľ trenia kĺbového spoja (k_k) je 0,2. Maximálny priemer kĺbovej hlavice (D_g) 0,036 m, klzné ložiská so súčiniteľom šmykového trenia 0,175 (k_{kl}). Priemer ložiska 30 mm (D_l). Moment zotrvačnosti kývavého hriadeľa v osi otáčania 48,94 Kg/cm² (I). Maximálna uhlová rýchlosť z normy 2,35 rad/s.

Trečiu silu v suchom kĺbovom uložení (F_t) je možné vypočítať vzťahom:

$$F_{max} \cdot k_k = F_t$$

$$3000 \text{ N} \cdot 0,2 = 600 \text{ N}$$

Krútiaci moment v tomto uložení je možné vypočítať:

$$F_t \cdot \frac{D_g}{2} = M_{k1}$$

$$600N \cdot \frac{0,036m}{2} = 10,8Nm$$

Trecia sila v kĺbových ložiskách:

$$F_{max} \cdot k_{kl} = F_l$$

$$3000N \cdot 0,175 = 525N$$

Krútiaci moment z ložísk:

$$F_l \cdot \frac{D_l}{2} = M_{k2}$$

$$525N \cdot \frac{0,03m}{2} = 7,875Nm$$

Maximálny krútiaci moment:

$$M_{k1} + M_{k2} = M_{kmax}$$

$$10,8 + 7,875 = 18,675Nm$$

Z dôvodu bezpečnosti návrhu je potrebné krútiaci moment predimenzovať kvôli bezpečnosti a iným faktorom. Bol preto stanovený maximálny krútiaci moment 25Nm.

Po stanovení maximálneho krútiaceho momentu je potrebné určiť potrebný výkon motora. Výkon motora sa určí vzorcom:

$$M_{kmax} \cdot \omega_{max} = P$$

kde ω_{max} je maximálne uhlové zrýchlenie:

$$2 \cdot \pi \cdot o_{max} = \omega_{max}$$

kde o_{max} sú maximálne dosiahnuté otáčky:

$$\frac{v_{max}}{\pi \cdot D_g} = o_{max}$$

kde v_{max} je možné zistiť z priebehu definovanom ISO normou. Táto hodnota bola vypočítaná maximálnym rozdielom pri vzorkovaní 500 ms z rovnice pri frekvencii 1Hz:

$$[21,5 \cos(0,0628X) + 3,5] = \text{aktuálne natočenie}$$

kde za X sa dosadzuje hodnota času v percentách (100 % = 1 s). Z tejto rovnici pri vzorkovaní 500 ms sa dá zistiť aktuálna pozícia z ktorej sa dá stanoviť rozdiel dvoch hodnôt. Výsledná maximálna rýchlosť je rovná maximálnemu zrýchleniu, ktorým je 0,04477 m/s. Preto ak sa postupne dosadí do vyššie uvedených rovníc, tak vypočítame maximálny výkon 31,34 W.

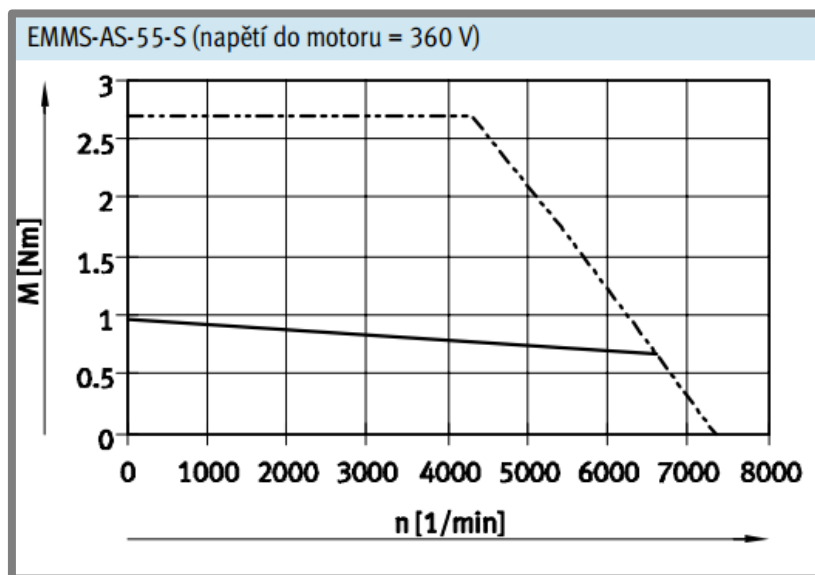
Uvažované boli rôzne varianty motorov, avšak najlepší variant je zostava: Motor EMMS-AS-55-S od firmy FESTO, ktorý váži 1,6 kg s maximálnym menovitým výkonom 444W. K nemu je vhodná prevodka WPLE040-032-SSS3AB od firmy Neugart s váhou 0,61 kg, so závitovou prevodovkou s prevodovým pomerom 32 a maximálnym vyvinutím krútiacim momentom 25 Nm.

Maximálne otáčky motora sú vynásobené veľkosťou prevodového pomeru prevodky (i) a tým sa získajú výstupné otáčky z motora:

$$o_{max} \cdot i = o_{vm}$$

$$22,5 \text{ ot/min} \cdot 32 = 720 \text{ ot/min}$$

Kde z momentovej charakteristiky motora je možné stanoviť výstupný krútiaci moment.

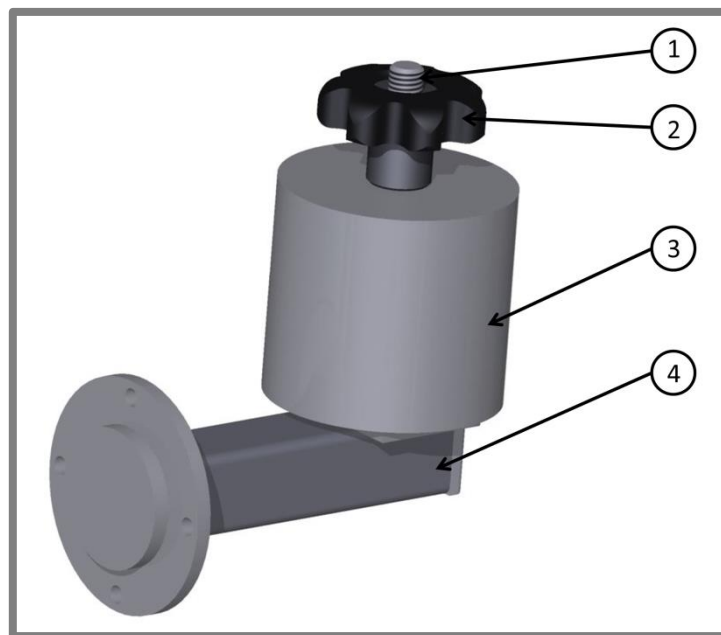


Obr. 5-16 Charakteristika motora [25]

Pri hodnote otáčok motora 720 ot/min sa docíli menovitý moment cca 0,9 Nm. Po vstupe tejto hodnoty do prevodky s prevodovým pomerom 32 získame maximálny menovitý moment 28,8 Nm, ktorý je dostatočný. Výber tohto motora s prevodovkou je síce veľmi predimenzovaný, avšak výber menej výkonných motorov z nižším výkonom by nepostačovali ako aj prevodovky z menším prevodovým pomerom by nedokázali vyvinúť dostatočne veľký krútiaci moment. Ak sa aj našiel vyhovujúci variant, tak bol rozmerovo veľmi veľký. Čo nevyhovuje z hľadiska ťažiska na posuvnom ráme.

Protizávažie motora

Motor s prevodovkou je umiestnený na ľavej strane posuvného rámu. Je teda potrebné, aby sa motor vyvažoval protizávažím na opačnej strane. Z dôvodu vyvažovania celej tejto mechanickej zostavy bolo navrhnuté protizávažie upevnené na posuvný rám. Postačuje jednoduchý tvar zložený z: rámovej konštrukcie (4), upínacej matice (2), protizávažia (3) a závitovej tyči (1).

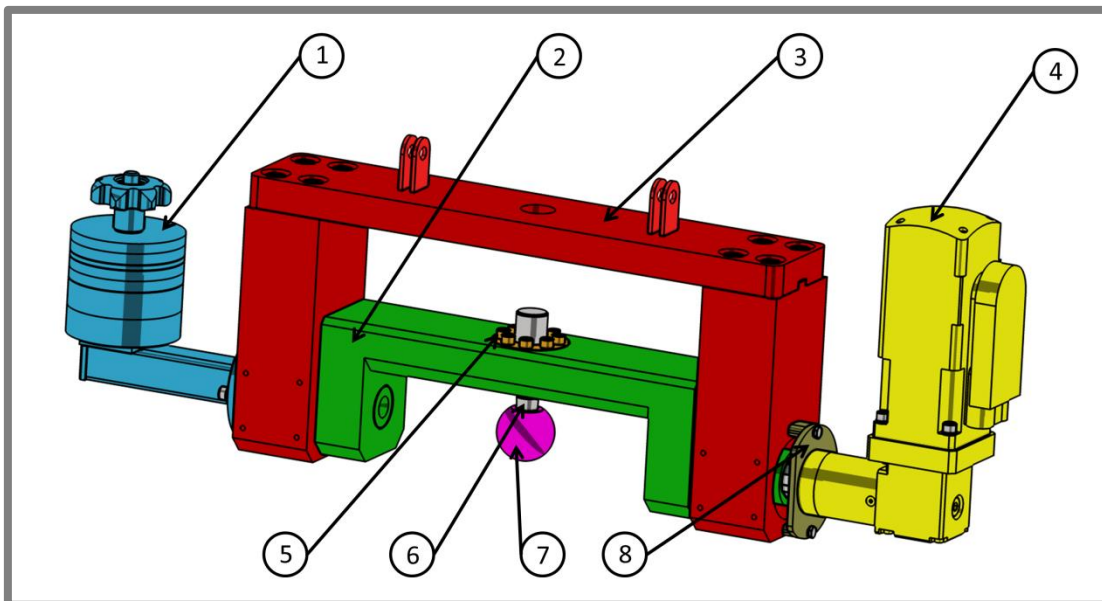


Obr. 5-17 Vyťažovacia časť zariadenia

Dĺžka štvorcového profilu bola stanovená metódou *návrh a kontrola*. Celý mechanizmus je navrhnutý symetricky, preto je možné zanedbať kývavý rám a hornú časť posuvného rámu. Následne v 3D programe Inventor boli definované správne materiály zostavy. Po rozrezaní celého modelu na polovicu mála pravá strana mechanizmu hmotnosť **5,94 kg** a ťažisko osovej vzdialenosti v Z smere **68 mm**. Ostatné osi X a Y sú symetricky rovnaké. Po navrhnutí dĺžky profilu 110 mm a závaží s hmotnosťou 1,9 kg boli namerané hodnoty ľavej strany zostavy: **5,94 kg** a ťažisko osovej vzdialenosti v Z smere **68 mm**.

Následne je na obrázku nižšie vidieť celú vrchnú mechanickú časť zariadenia zloženú z protizávažia (1), posuvného (3) a kývavého rámu (2), v ktorom je upevnený trň (6) vo svornom puzdre (5), na ktorom je narazená kľbová hlavica (7).

Motor s prevodovkou (4) je prepojený s posuvným rámom pomocou zloženej príruby (8).



Obr. 5-18 Kompletná zostava kývavého hriadeľa a posuvného rámu

Pevnostná analýza skrutkového spoja

Na spojenie medzi prírubou a prevodovkou sú použité skrutky. Je potrebné tento skrutkový spoj preveriť pevnostnou analýzou.

Bola simulovaná zostava jednej strany posuvného rámu spolu s prírubou a prevodovkou za použitia skrutiek M3. Materiály boli definované následne:

Časť posuvného rámu je z nehrdzavejúcej ocele 1.4301. Taktiež je motor spolu s prevodovkou definovaný samostatne ako jeden materiál, aby sme mohli doceliť požadovanú hmotnosť tejto zostavy. Všetky ostatné komponenty - ako skrutky a príruby sú z všeobecnej konštrukčnej ocele.

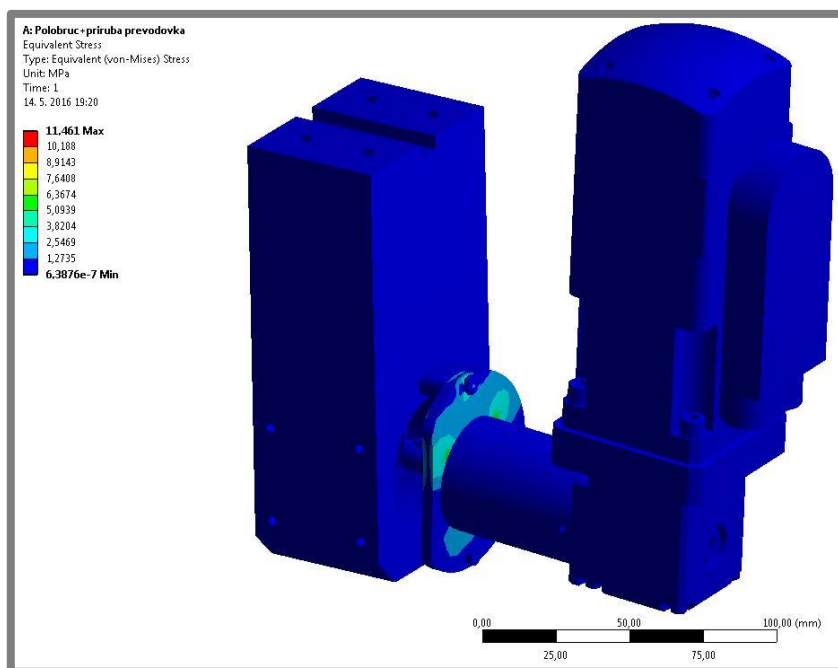
Prevodovka a motor je definovaná ako jedna časť, preto nie je potrebné v nich definovať žiaden kontakt. Sú preto určené nasledujúce kontakty: „Rough“ je použitý na kontakt medzi časťou posuvného rámu, prírubou a prevodovkou. Kontakt „no separation“ je použitý medzi všetkými hlavami skrutiek a ich dosadzovanej plochy. Všetky ostatné kontakty sú pevné.

Celková sieť zostavy je definovaná na veľkosť elementu 2,5 mm, kde všetky skrutky majú iba 1 mm. Počet elementov celej siete je 176 350 a počet uzlov 288 963.

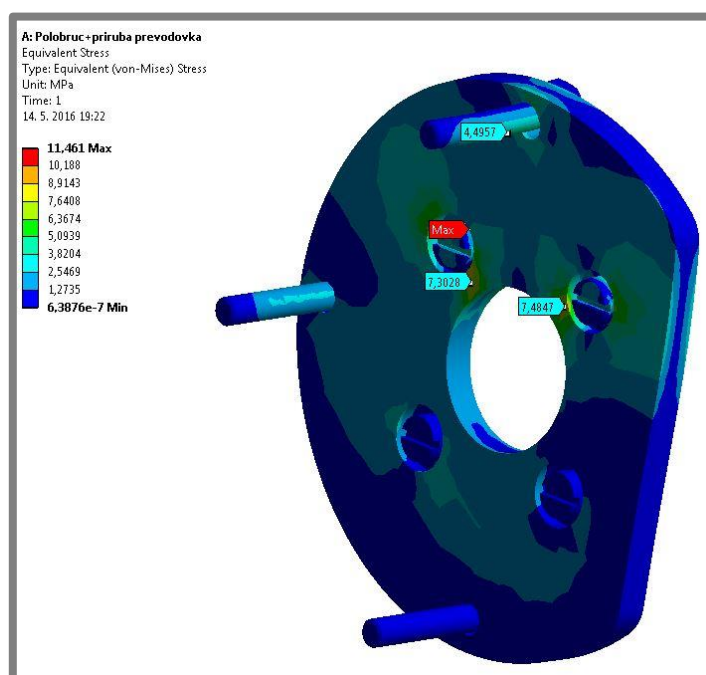
Základové okrajové podmienky.

Prvou je definovanie gravitačnej sily v smer osi Y. Druhou je definovanie pevného uloženia na posuvnej časti rámu. V prílohe 5 **Analýza skrutkového spoja prevodovky** je vyobrazená výpočtová sieť a základné okrajové podmienky pre simuláciu.

Po vyhodnotení vyššie definovanej pevnostnej simulácií, konkrétne napätovej sily bolo zistené, že maximálna hodnota, akou by mali byť namáhané skrutky je približne 9 MPa. Materiál klasickej konštrukčnej oceli má medzu sklzu najmenej 180 MPa. Zvolený skrutkový spoj je dostačujúci pre definované uloženie.



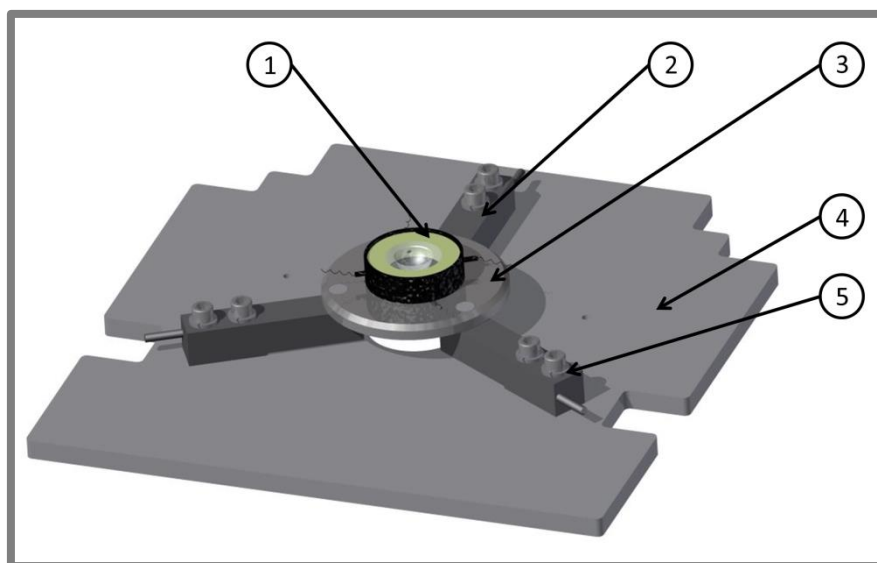
Obr. 5-19 Výsledok simulácie]



Obr. 5-20 Detail na kritické miesto simulácie

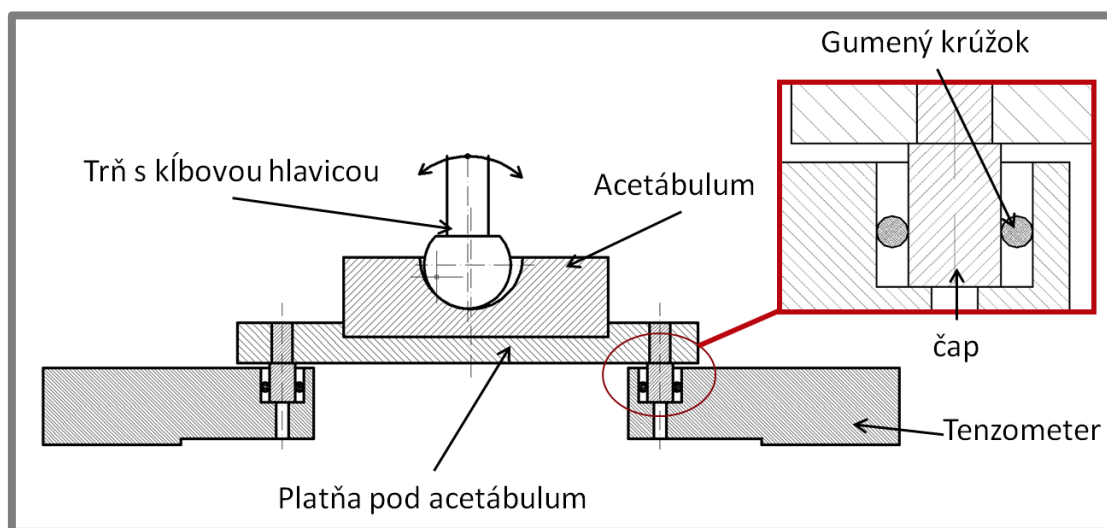
5.1.5 Platňa pod misku s acetábulom

Miska s acetábulom (1) je uložená na platni (3), ktorá spája všetky tri tenzometre (2) a umožňuje usadenie misky s acetábulom. Je potrebné, aby táto platňa bola z dôvodu odstránenia excentricity klbového uloženia vždy prispôsobiteľná. Bude docielené tým prispôsobenie každej klbovej dvojici individuálne bez ohľadu na rozmery hlavíc a klbových jamiek.



Obr. 5-21 Zostava meracej aparatúry zariadenia

Táto podmienka ovplyvnila aj typ použitých tenzometrov. A to z dôvodu, že daný typ tenzometrov HLCB2C3, sa používa na meranie pôsobiacej sily pri vybraných strojoch. Aplikácia pre zariadenie vyhovuje. Konštrukčný návrh upevnenia je nasledovný. V platni sa vyrobí tri otvory so závitmi pre tri čapy. Tieto čapy sa naskrutkujú do platne s rovnakým predpätým a to sťahovacím momentom 20 Nm, kvôli zaisteniu roviny medzi čapmi. Následne sú na čapoch urobené drážky pre gumové krúžky. Tie budú pohlcovať a tlmiť excentricitu tvorenú kĺbovým uložením. Následne celá zostava platne s čapmi a gumovými krúžkami je položená na ohybové tenzometre. Tuhosť gumových krúžkov musí byť preverená iba samotným pokusom z dôvodu veľmi ťažkého výpočtu tuhosti týchto krúžkov hlavne preto, že do výpočtu by vstupovalo veľmi veľa okolitých faktorov.



Obr. 5-22 Schematický popis uloženia platne

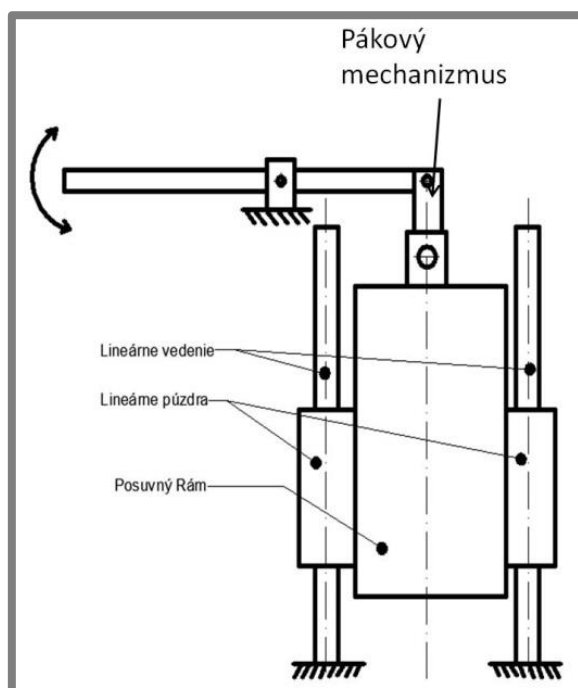
Pevnostná analýza priehybu platne spolu s tenzometrami bude prevedená spolu s celým konštrukčným rámom zariadenia, aby bola dosiahnutá lepšia dôveryhodnosť

simulácie a aby sa zabránilo možným chybám pri zadávaní okrajových podmienok pre simuláciu.

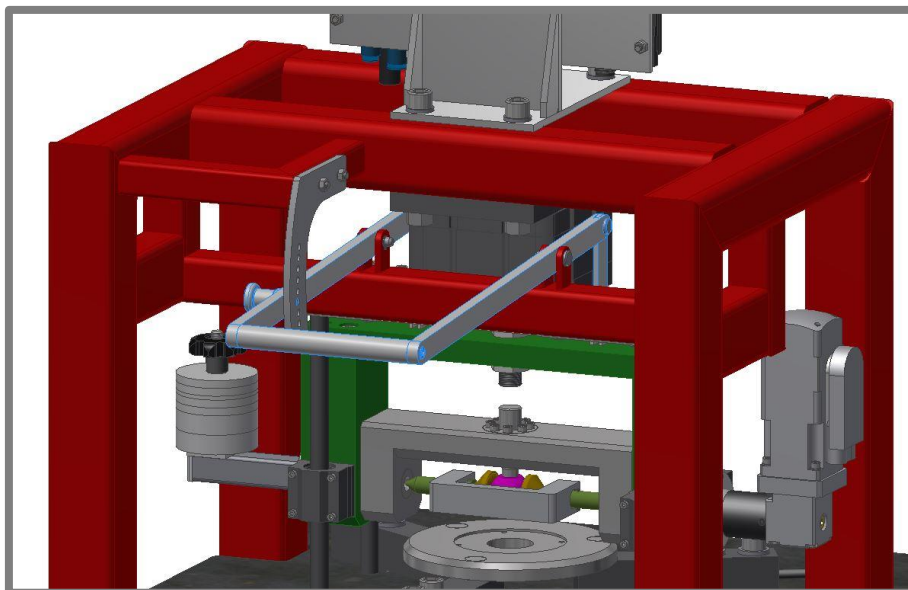
5.1.6 Výmena hlavice a acetábulovej misky

Zariadenie musí byť navrhnuté tak, aby bolo možné vymieňať kĺbové hlavice, ako aj misku s acetábulom z dôvodu širšieho skúmania kĺbových hlavíc a to od priemeru 26 mm až do 36 mm. Taktiež je potrebné počítať s miskami a acetábulami, ktoré môžu byť umelé, keramické, kovové a sklenené. Bolo preto potrebné zmerať jednotlivé typy acetábul a kĺbových hlavíc pre určenie maximálnych a minimálnych hodnôt pri výmene.

Výmenu bude zaisťovať jednoduchý pákový mechanizmus, ktorý bude pohybovať s celým posuvným rámom po lineárnom vedení. Pri určitej polohe sa dokáže upevniť jednoduchým aretačným mechanizmom.

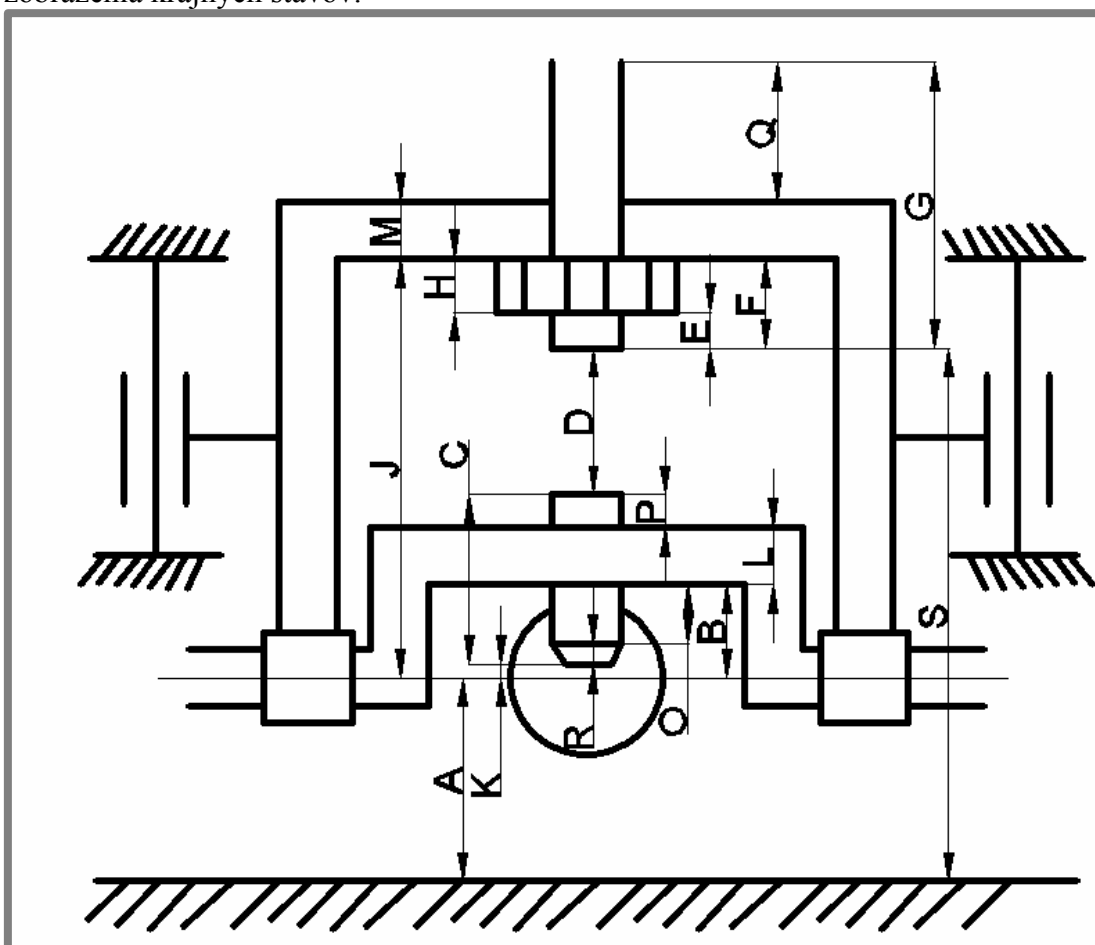


Obr. 5-23 Pákový mechanizmus výmeny hlavíc



Obr. 5-24 3D vizualizácia mechanizmu

Je potrebné vypočítať jednotlivé vzdialenosti pre vylúčenie kolízie s pneumatickým valcom a kĺbového tŕňa. Bola preto vytvorená návrhová schéma pre prehľadnejšie zobrazenia krajných stavov.



Obr. 5-25 Schéma výpočtu rozmerov pre výmenu hlavice

Navrhnuté parametre:

L - hrúbka kývavého hriadeľa = 30 mm
 B- vzdialenosť spodného okraja k osi rotácií = 27 mm
 J – výška vodiaceho rámu od osi k spodnej časti = 117 mm
 M – hrúbka vodiaceho rámu = 20 mm
 G – výška skrutkovice piesta = 80 mm
 H – hrúbka matice = 10 mm
 R – výška kužeľovej plochy nad tŕňom = 14 mm
 S – vzdialenosť začiatku skrutkovice od podložky = 127 mm
 W – dĺžka lineárnych tyčí

Vstupné parametre:

typ jamky, priemer hlavice, veľkosť vonkajšieho priemeru a označenie hĺbky kužeľa
 Vstupné parametre sú hodnoty, ktoré boli vypočítané a namerané pri určitých variantách. Hodnoty sú uvedené v prílohe 6 **Tabuľka meraných rozmerov hlavíc.**

Výstupné dĺžky pre určitú vybranú variantu:

O – medzera medzi osou a spodkom kývavého hriadeľa = $B-R-K$
 F – vzdialenosť skrutkovice z vodiaceho rámu = $A+J-S$
 E – veľkosť vysunutia od matice = $F-H$
 C – minimálna výška tŕňa = $L+R+O$ +rezeva
 P – veľkosť vysunutia od kývavého hriadeľa = $C-O-L-R$
 Q – veľkosť priestoru na nepoužitej skrutkovici = $G-F-M-H$
 Z – kolízia s horným rámom vedenia = $52 + A + J+M$
 X – dovolený rozdiel = $W-Z$
 Y – rozdiel pri maximálnej hodnote = $X-Q$

Boli prepočítane všetky varianty, z ktorých boli preverené navrhnuté parametre.

Preukázalo sa, že žiadna z vybraných variant nebude v kolízií s ostatnými telesami.

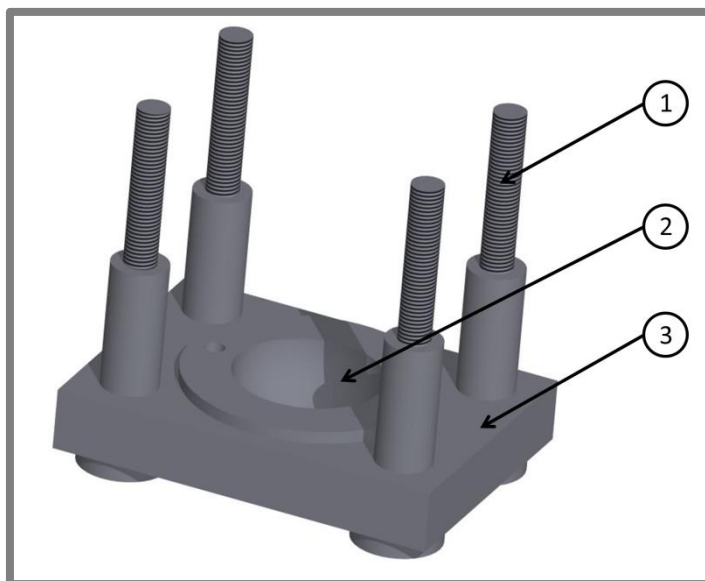
Môžeme preto brať navrhované parametre už za pevne dané.

5.1.7 Prípravok na vystred'ovanie hlavice

Je potrebné, aby kĺbová hlavica bola v osi rotácií kývavého hriadeľa, aby nedochádzalo ku vzniku vedľajších síl kvôli vyššej alebo nižšej polohe kĺbovej hlavice. Taktiež táto výmena bude prebiehať viackrát a neustále, ak bude potrebné vymieňať hlavicu. Kvôli zjednodušeniu a rýchlosti vystred'ovania hlavice bol zostrojený prípravok, ktorý by túto činnosť zjednodušil.

Konštrukčné varianty

Boli zostrojené dva varianty prípravkov na vystred'ovanie. Prvý prípravok bol nasledovný.

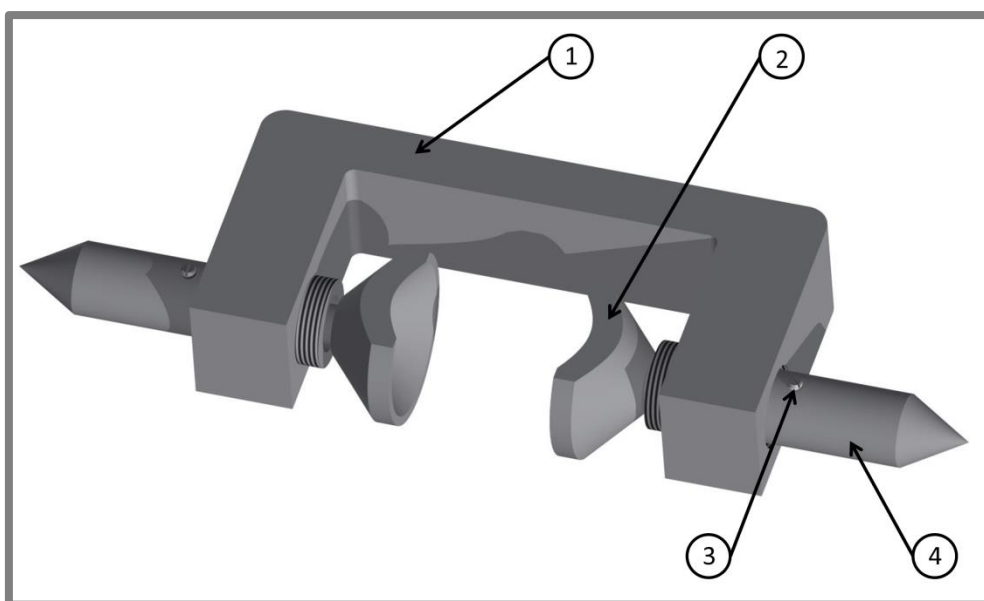


Obr. 5-26 Prvý variant prípravku

Prípravok sa skladal z výmennej časti (2), ktorá by bola pre každú hlavicu vyrobená zvlášť, vymedzovacie stĺpy (1) a samotného základu (3). Prípravok by sa aplikoval nasledujúcim opisom. Najprv by sa natočil celý kývavý hriadeľ a odstránila by sa miska s acetábulom. Potom by sa pripevnila výmenná časť, ktorá by bola pre danú hlavicu a tá by sa pevne upevnila so stĺpmi ku kývavému hriadeľu. V poslednom rade by sa dorazila kĺbová hlavica s trňom o výmennú časť prípravku.

Nevýhoda varianty spočíva vo výrobe viac častí s pomerne veľkou presnosťou. Taktiež bude potrebné zabezpečiť dostatočujúci prítlak k ploche ako aj možnosť montáže.

Druhý variant spočíva vo vystred'ovaní pomocou samotného hriadeľa. Prípravok by bol nasledovný.



Obr. 5-27 Druhý variant prípravku

Skladá sa z tyčí (4), ktoré majú kužeľové konce slúžiace zaisteniu osi. Na opačnej strane je závit, ktorý sa priskrutkuje do držiaku (1). Do tyčí je vsunutá vodiaca tyč (2) s kužeľovým tanierom na konci. Medzi vodiacou tyčou a puzdrom je použitá pružina, ktorá zaisťuje dostatočné pritlačenie. Tie sú zaistené závitovým červíkom (3). Kužeľové taniere tak docielia vystredenie všetkých kĺbových hlavíc a nie je potreba vyrábať viac druhov.

Nevýhodou varianty je použitie pomerne veľkých presností na výrobu ako aj tuhosť pružín.

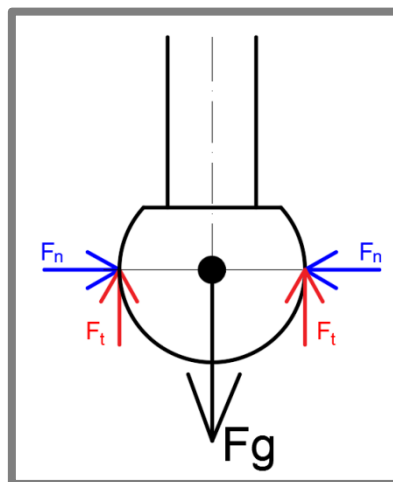
Bol zvolený druhý variant kvôli presnosti systému. Taktiež nie je potrebné vyrábať viac prítlačných tanierov pre rôzne rozmery hlavice. Prípravok využíva na vystredovanie samotnú os hriadeľa, čo zabezpečí lepšiu presnosť ako prvý variant.

Podrobnejší popis zvolenej konštrukcie prípravku

Je potrebné definovať veľkosť sklonu uhla taniera, ktorý by vyhovoval pre daný rozsah kĺbových hlavíc. Taktiež je potrebné definovať veľkosť a silu prítlačnej pružiny a v poslednom rade je potrebné definovať tolerancie pre výrobu.

Veľkosť sklonu uhla nutného na pokrytie rozsahu hlavíc sa zisťoval prostredníctvom grafického nákresu AutoCad. Kde sa nakresli požadované veľkosti hlavíc s najmenším a najväčším možným priemerom a taktiež s požadovaným rozstupom. Následne sa vytvorila úsečka, ktorá bola tangenciálna na obidve kĺbové hlavice. Zmeral sa uhol medzi úsečkou a spoločnou osou obidvoch kĺbových hlavíc.

Rozmery prítlačnej pružiny závisia na požadovanej prítlačnej sile. Prítlačná sila je vypočítaná nasledne:



Obr. 5-28 Silový rozbor

Vstupné hodnoty:

Hmotnosť trňa (m_t) = 0,144 kg

Hmotnosť najväčšej použitej kĺbovej hlavice (m_h) = 0,149 kg

Súčiniteľ trenia pri kontakte oceľ na oceľ (k) = 0,2

Výpočet zaťažovacej sily F_g :

$$F_g = (m_t + m_h) \cdot g = (0,144 + 0,149) \cdot 9,81 = 2,87 \text{ N}$$

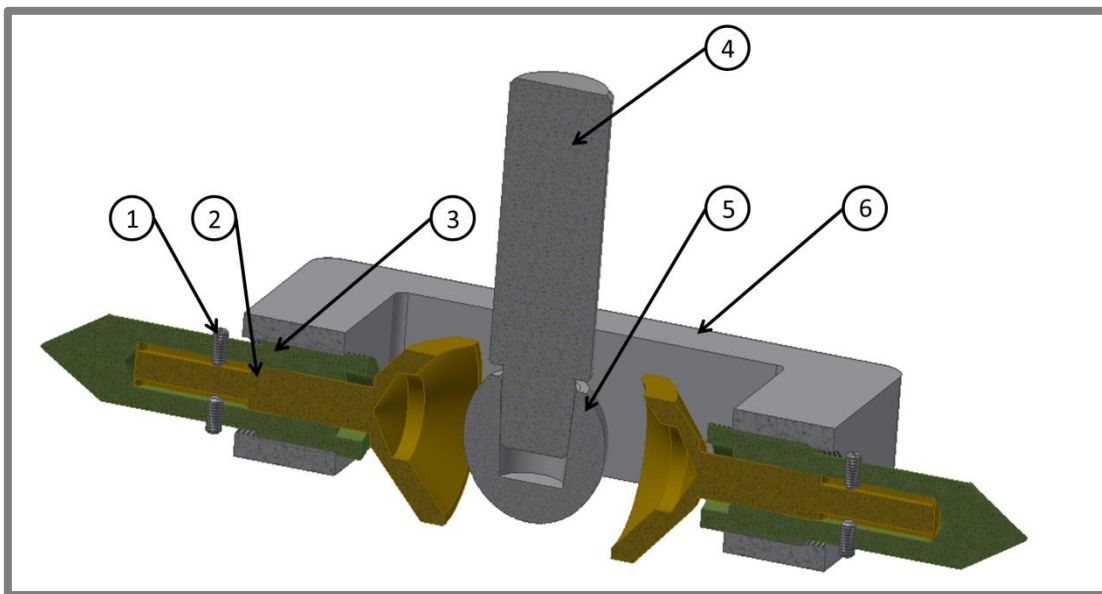
Zostavenie rovnice rovnováhy:

$$F_g = 2 \cdot F_n \cdot k$$

$$F_n = \frac{F_g}{2 \cdot k}$$

$$F_n = \frac{2,87}{2 \cdot 0,2} = 7,175 \text{ N}$$

Minimálna vypočítaná sila pre jednu prítlačnú silu je 7,175 N. Je však potrebné k tejto sile započítať ešte prítlak. Prítlak o veľkosti 3N by mal byť postačujúci. Výsledne navrhnutá pružina by mala mať tlačennú silu minimálne 10 N s dosiahnutou dĺžkou pružiny 19,3 mm. Vodiaca tyč má priemer 8 mm a vonkajší rozmer pre pružinu je maximálne 11,6 mm. Bola preto zvolená pružina s označením 0,8x10x40x10 od firmy Černák pružiny. Táto pružina má definovanú dĺžku 40 mm, priemer drôtu 0,8 mm. Pri stlačení 9,59 mm má vyvinúť silu o veľkosti 20,12 N, čo pri lineárnom prepočte pre potrebnú vzdialenosť je 10 N.

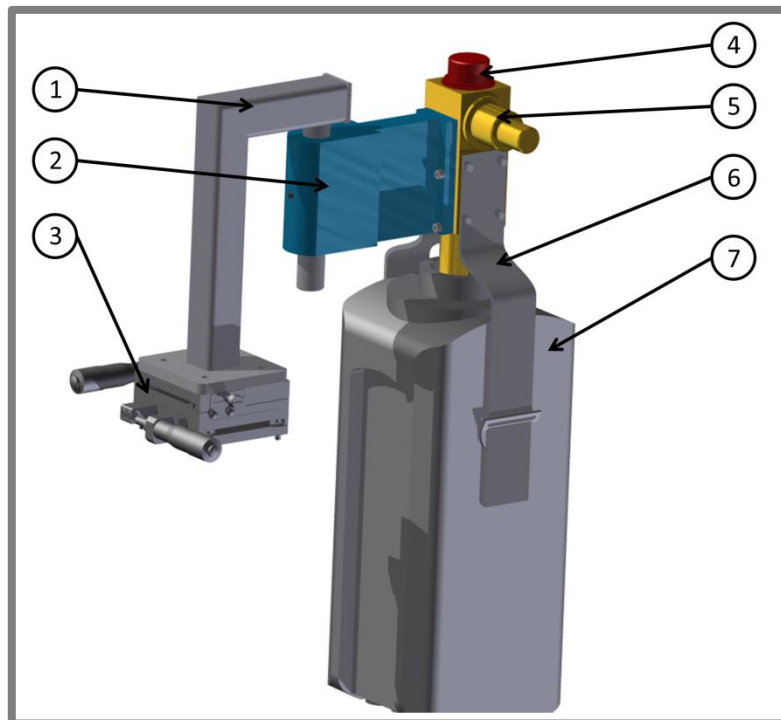


Obr. 5-29 Zostava ustálenia hlavice

5.2 Spodná mechanická časť

5.2

Upevnenie optickej aparatúry bude prevedené na spodnej časti rámovej konštrukcie. Kamerové upevnenie sa skladá zo samotného rámu (1), z posuvnej plošiny (3) a zo samotnej optickej aparatúry zloženej s objektívom (4), mikroskopu (5) pridržiavaného polohovateľným držiakom (2). Na mikroskop sú namontované pridržiavače (6) vysokorýchlostnej kamery (7).



Obr. 5-30 Zostava spodnej mechanickej časti zariadenia

5.2.1 Posuvná plošina

Je potrebné aby rám, ktorý bude držať optickú aparatúru bolo možné polohovať v dvoch osách. A to z dôvodu, že ak je položená miska s acetábulom mierne vyosená, tak nie je možné aby optická aparatúra snímala požadovaný dej preto je potrebné, aby sa pred samotným meraním nastavila poloha optickej aparatúry do dostačujúcej polohy pre pozorovanie kĺbového spojenia.

Posuvná plošina bola vybraná na základe požiadaviek. Je nutné, aby plošina udržala danú optickú aparatúru. Táto optická aparatúra váži 6,03 kg a pôsobí na ramene dlhom 0,2 m. Z týchto údajov je vypočítateľný krútiaci moment pôsobiaci na plošinu:

$$r \cdot m_{op} \cdot g = M_{vs}$$

$$0,2 \cdot 6,03 \cdot 9,81 = 11,8 Nm$$

aby bola dodržaná bezpečnosť, tak sa vypočítaná hodnota stanoví na 15 Nm.

Ďalšou podmienkou je, aby bolo možné sa posúvať v rozsahu 20 mm. Taktiež aj aby bolo zaistené jemné polohovanie a to aspoň 15 μm.

S uvedenými parametrami vyhovovuje plošina od spoločnosti MISUMI a s označením XYSG80. Plošina je o rozmeroch 80 mm x 80 mm s výškou 40 mm. Maximálny moment pôsobiaci v príslušnej osi vzhľadom k optickej aparatúre je 17,7 Nm rozsah posunu plošiny je ±12,5 mm, ako aj presnosť plošiny je 12 μm.

5.2.2 Nosný rám

5.2.2

Hlavnou požiadavkou na rám bolo, aby optická aparátúra bola ľahko demontovateľná a montovateľná z dôvodu veľkého využívania kamery na Ústave konštruovania. Navrhnutá bola kvôli tomu jednoduchá základná platňa, ktorá sa pripevní k posuvnej plošine. Táto platňa je privarená k dvom štvorcovým profilom do tvaru L. Na konci štvorcového profilu bude nasunutá tyč, ktorá bude privarená k profilu.



Obr. 5-31 Konštrukcia rámu držiaci optickú aparátúru]

5.2.3 Optická aparátúra

5.2.3

Aparátúra je zložená z vysokorýchlostnej kamery Phantom V700. Mikroskop s označením VM-1V-1X je určený pre kamerové systémy s C-čkovým upevnením mikroskopu od spoločnosti MEIJI Techno. S mikroskopom bola dodaná aj polohujúca plošina od tej istej spoločnosti. Posledným komponentom tohto systému je objektív s štvornásobným zväčšením a pracovnou vzdialenosťou 24 mm. Celá táto optická aparátúra bola prevzatá už z používaného kyvadla.

5.2.4 Pevnostná analýza

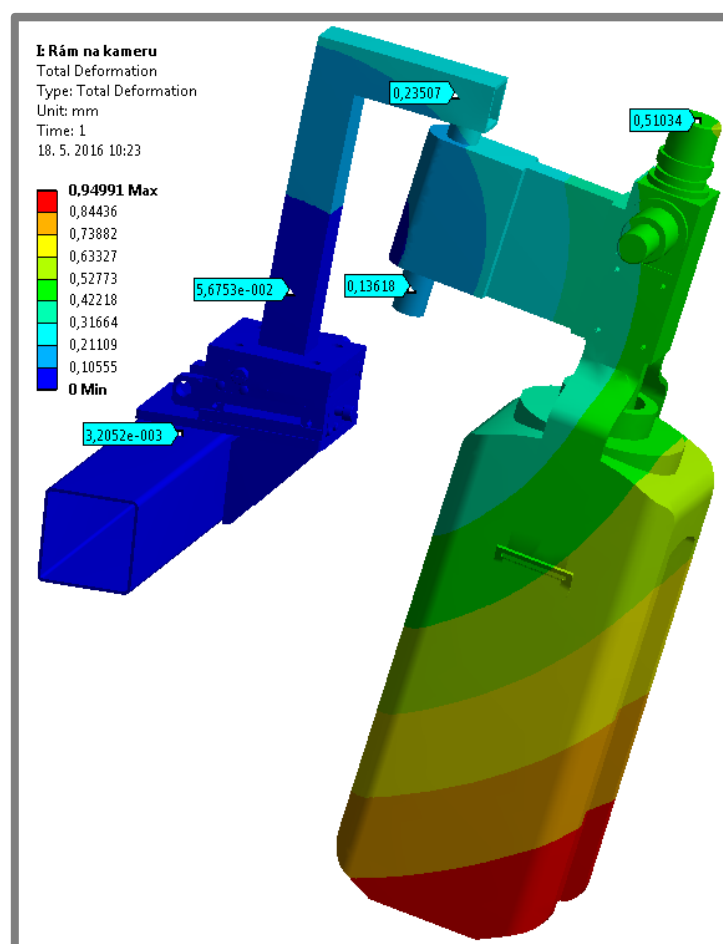
5.2.4

Keďže na danú zostavu nepôsobí žiadne zaťaženie okrem gravitačného zrýchlenia Zeme, tak bola pri výpočte použitá iba pôsobiaca gravitačná sila. Potrebné bolo stanoviť vlastnosti použitých materiálov u vysokorýchlostnej kamery, mikroskopu s objektívom a upevneného pridržiavača, aby bolo možné použiť gravitačnú silu. Hustota materiálu bola prebratá z programu Inventor, ktorý po zadaní váhy vygeneroval hustotu pri danom objeme. Celá optická aparátúra bola simulovaná ako jedna časť, pričom odpadlo definovanie kontaktov. Hustota celej aparátúry bola $1,189 \text{ g/cm}^3$. Definovaná bola aj lineárna plošina, ktorá bola kvôli zjednodušeniu vložená ako jedna zostava. Hustota lineárnej plošiny tvorí $8,004 \text{ g/cm}^3$. Všetky časti simulovanej zostavy sú pevne spojené. Preto všetky kontakty boli definované ako „bonded“.

Celková sieť bola najprv definovaná všeobecne podľa programu. Zvlášť bol však definovaný nosník 5 mm na element. Taktiež lineárna plošina, držiak a posuvné rameno boli definované na jemnejší element a to 4 mm.

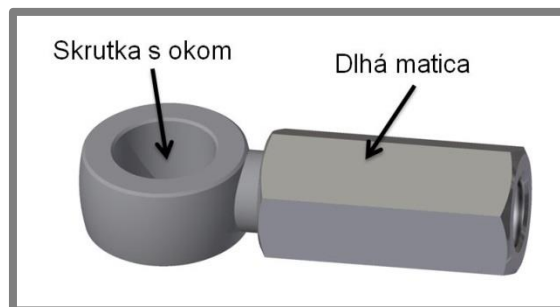
Okrajové podmienky boli definované následne. Bola aplikovaná gravitačná sila na celú zostavu a plochám na okraji štorcového nosníka boli odobraté všetky stupne voľnosti. V prílohe 7 **Analýza optickej aparatúry** je vyobrazená použitá modelová sieť ako aj základné okrajové podmienky pre simuláciu.

Všetky komponenty sa deformujú a posúvajú, tak ako bolo predpokladané. Dôležité zistenie je, že vrchol objektívu sa pod záťažou vlastnej váhy posunul v Y smere o 0,5 mm, čo je pri pozorovaní mikroskopom badateľný rozdiel. Odchýlku nebude možné kompenzovať cez posuvnú plošinu ako ani cez posuvný pridržiavač mikroskopu. Bolo potrebné navrhnuť prípravok, ktorý by dokázal kompenzovať túto situáciu. Keďže nie je možné vymeniť tyč, na ktorú je upnutá optická aparatúra, navrhnutý bol prípravok, ktorý spôsobí to, aby koncový bod pri zvaranej tyči bol vystužený.



Obr. 5-32 Výsledná analýza optickej aparatúry

Prípravok bol navrhnutý tak, aby bola možná ľahká a rýchla demontáž a aby nebol prípravok zbytočne cenovo nevýhodný. Prípravok sa skladá z dvoch častí a to zo skrutky s okom zo závitom M20 a dlhou maticou. Prípravok je tým pádom jednoducho polohovateľný a ľahko demontovateľný.

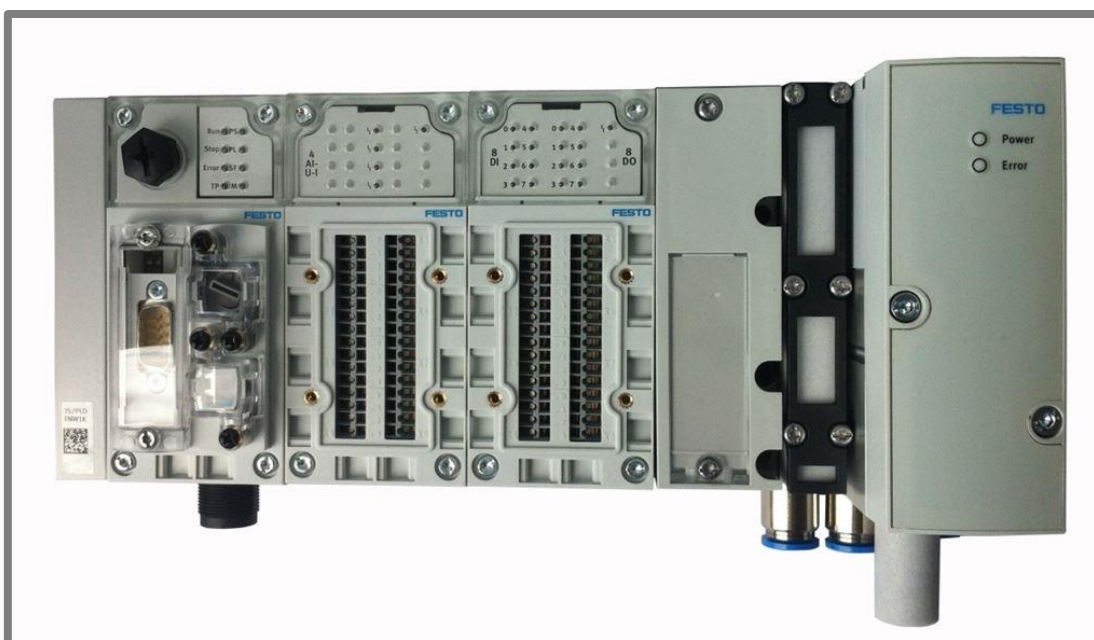


Obr. 5-33 Prípravok spevnenia

5.3 Pneumatický systém a PLC riadiaca jednotka

5.3

Dôležitou súčasťou zariadenia je pneumatický pohon zabezpečujúci prítlačnú silu zariadenia. Celý pneumatický systém je zaobstaraný od firmy FESTO.



Obr. 5-34 PLC riadiaca jednotka s proporčionálnym ventilom

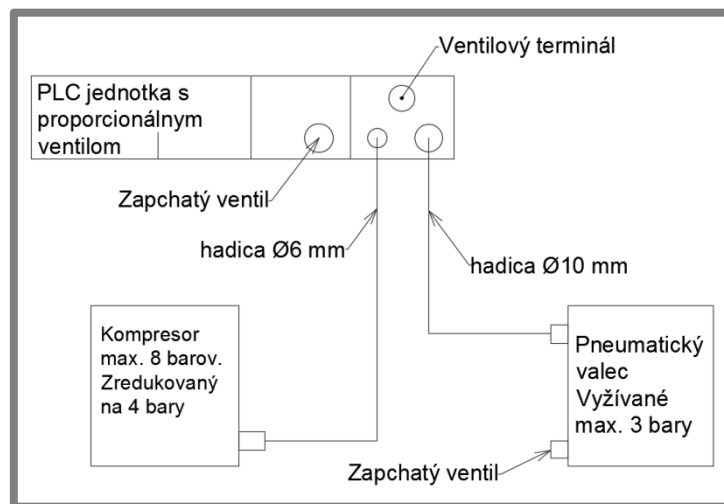
Hlavný člen pneumatického systému je proporčionálny ventil. Je potrebné, aby bol docielená potrebná rýchlosť náplne a odsatia vzduchového média. Proporčionálny ventil musí byť umiestnený čo najbližšie k pneumatickému valcu z dôvodu čo najmenšieho obsahu vzduchového média v hadici.

Zdôvodnenie výberu pneumatického valca a proporčionálneho ventilu bolo popísané v kapitole **Pneumatický valec**. Do systému je potrebné započítať aj zdroj tlakového systému. V návrhu sú možné dva varianty zdroja tlaku vzduchu. Prvým je použitie rozvodu vzduchu v budove - avšak tento variant by bol možný v prípade prítomnosti prívodu vzduchu v miestnosti, kde bude zariadenie uložené. Keďže v miestnosti uloženia spomínaného zariadenia nebude rozvod vzduchu, nie je reálne počítat' s týmto variantom. Druhým variantom je samotný kompresor. Výber kompresora však musí spĺňať určité kritéria. Prvé kritérium je, aby dosahoval minimálny tlak 6 barov. Druhým kritériom je, aby kompresor nebol príliš hlučný z dôvodu používania

v laboratóriách Ústavu konštruovania. Treťou podmienkou je, aby kompresor mal reguláciu vzduchu, aby nebolo vpustené do systému viac tlaku ako je predpísané v proporcionálnom ventile. Proporcionálny ventil určuje, že vstupný tlak musí byť o 2 bary väčší, ako je používaný tlak vo valci. Posledným kritérium je, aby kompresor bol elektrický z dôvodu čistoty a hlučnosti prostredia.

Kompresor, ktorý spĺňal kritéria a ktorý bol dostupný na Ústave konštruovania je zariadenie s označením: Whispair compressor CW17/4. Elektrický prístroj dokáže vyvinúť maximálne 10 barov. Určený je pre laboratórne použitie preto je veľmi tichý. Taktiež má už zabudovanú reguláciu výstupného tlaku vzduchu. Výstupný priemer trubice z kompresora je 6 mm.

Na nižšie uvedenej schéme pneumatického systému je možné vidieť, že 6 mm trubica z kompresora smeruje do proporcionálneho ventilu. Označenie otvoru v proporcionálnom ventile je 1. Následne z otvoru s označením 3 na proporcionálnom ventile, vedie 10 mm trubica do pneumatického valca.



Obr. 5-35 Schéma zapojenia pneumatického systému

Všetky konce trubíc sú zaistené rýchlopínacími ventilovými redukciami, či už s 6 mm alebo 10 mm otvorom.

5.4 Rámová konštrukcia

Po navrhnutí hlavných častí zariadenia je potrebné navrhnuť rám konštrukcie samotného simulátora. Hlavnou požiadavkou na rám je hodnota priehybu pod ułożením samotnými tenzometrami a to z dôvodu rozostrenia samotného obrazu. Celý rám je zložený z troch základových častí, ktoré sú spojené skrutkovým spojom, kde na strednú časť je upevnená základová platňa.



Obr. 5-36 Nosná konštrukcia zradenia rozdelená na tri časti

5.4.1 Základová platňa

5.4.1

Táto platňa slúži na upevnenie lineárnych tyčí a tenzometrov. Veľkosť rozstupov tyčí je daná tromi tenzometrami, ktoré musia byť umiestnené rovnomerne po 120° a nesmie dochádzať ku kolíziám s lineárnymi tyčami. Hrúbka základovej platne sa bude odvíjať po pevnostnej analýze rámu. Plochy pod tenzometrami, musia byť v potrebnej tolerančnej rovine pre presnosť merania tenzometrov. Základová platňa bude zoskrutkovaná so stredným rámom samostatne a to z dôvodu, aby mohla byť samotná stredná časť so základovou platňou obrábaná. Docieli to čím najlepší dotyk medzi uvedenými povrchmi. Podmienka je potrebná z aspektu, aby sme mali výsledky z pevnostnej analýzy približne porovnateľné z reálnym stavom konštrukcie.

5.4.2 Stredná časť rámu

5.4.2

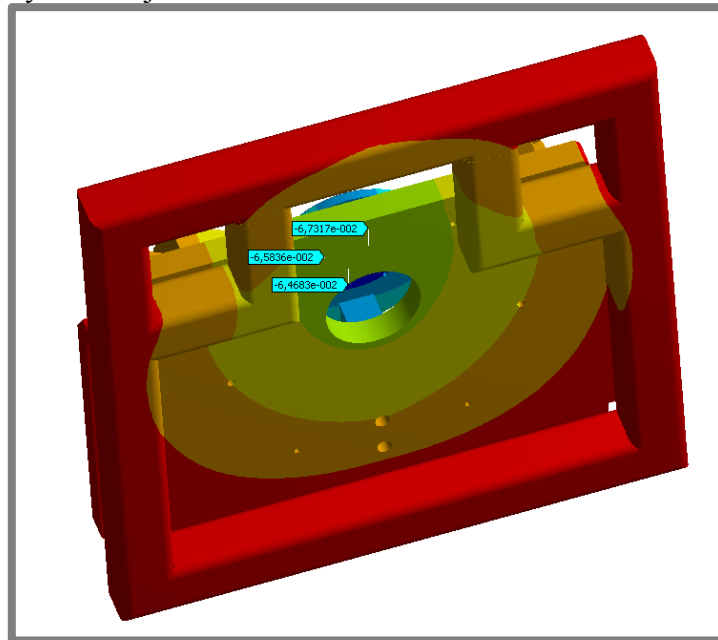
Na túto časť rámu je z vrchnej časti priskrutkovaná základová platňa ako aj vrchná časť rámu. Zo spodnej časti tohto rámu bude priskrutkovaná spodná časť, ktorá bude položená na podlahe držiaca kamerový systém. Spomínaná metóda dovoľí demontáž vrchného a spodného rámu. Potrebná bude pri kalibrácii tenzometrov.

Variety spevnenia

Stredná časť rámu spolu so základovou platňou boli samostatne podrobené pevnostnej analýze, aby sme mohli použiť tu najlepšiu variantu. Najlepší variant bude použitý taktiež vo finálnej analýze kvôli overeniu a z dôvodu, že následná simulácia nie veľmi dobre simuluje reálny stav, slúži preto iba na zistenie miest na spevnenie. Okrajové podmienky, ako aj záťaž sú vo všetkých variantoch zhodné. Používaná sieť, na ohybových tenzometroch, platne acetábula a samotnej základovej platne, je o veľkosti elementu 5 mm. Všetky ostatné profily majú veľkosť elementov 10 mm. Taktiež na všetky varianty pôsobí rovnaká sila o veľkosti 3500 N a fixné sú štvorcové plochy pod pripevnenými nohami. Definované kontakty medzi

tenzometrami a platňou acetábula sú „frictional“ s koeficientom 0,1. Všetky ostatné kontakty sú „bonded“.

Prvý navrhovaný variant je vidieť na Obr. 4-37.

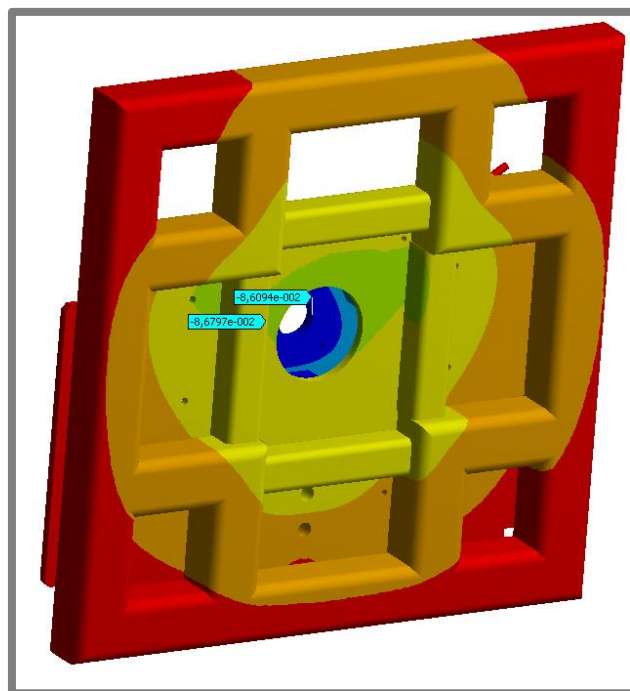


Obr. 5-37 Prvý variant návrhu

Časť pod dvomi ohybovými tenzometrami je vystužená platňa o hrúbke až 30 mm. Použité sú štvorcové profily s rozmermi 60x60x5 mm. Výsledkom z tohto variantu bol maximálny priehyb v zvislom smere rovný 0,067 mm.

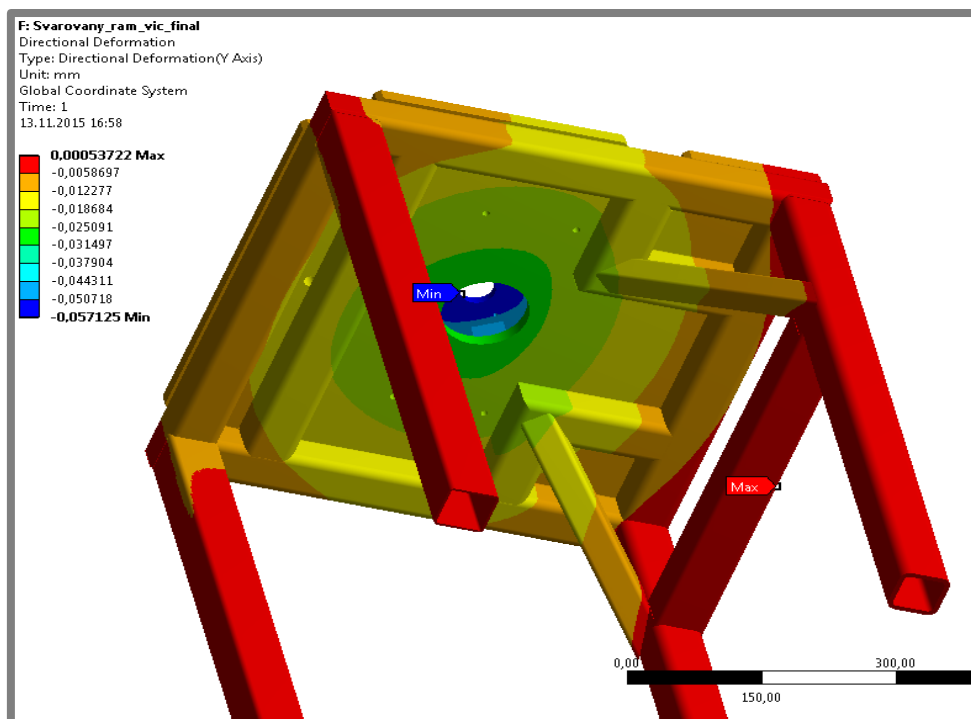
Veľká nevýhoda tohto variantu je v hrúbke základovej platne z finančného dôvodu.

Druhý variant je použitie tenšej základovej platne. Ide o použitie platne s hrúbkou 10 mm, kde sú použité štvorcové profily o rozmeroch 60x60x5 mm, v strednej spájacej časti zas o rozmeroch 40x40x4 mm. Výsledný priehyb v osi zvislom smere však nie je lepší ako predchádzajúci variant. Jedná sa o maximálnu hodnotu 0,087 mm. Je však použitá tenšia základová platňa a náklady na výrobu by boli oveľa menšie.



Obr. 5-38 Druhý variant návrhu

V treťom variante bola zvolená stredná cesta. Bola použitá základová platňa o hrúbke 20 mm. Rozmery štorcových profilov boli 60x60x4 mm. Pridaná bola taktiež väčšia výstuž pod ohybové tenzometre a to pridaním šikmých profilov.



Obr. 5-39 Tretí variant návrhu

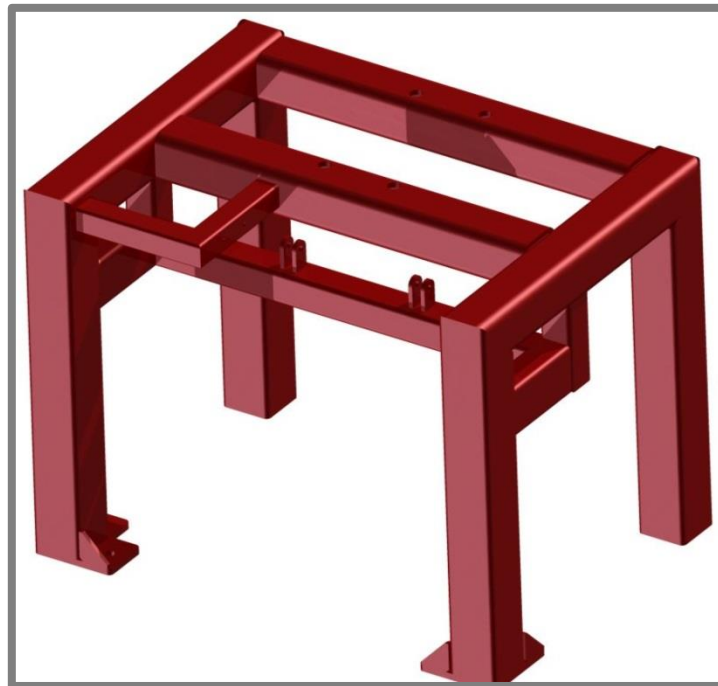
Výsledok tohto variantu je maximálny priehyb vo zvislom smere rovný 0,027 mm. Finančné ohodnotenie tretej metódy by nemalo byť vysoké. Síce je definovaný

maximálny priehyb 0,08 mm, ale je potrebné brať v úvahu, že pri použití tohto variantu na celej zostave bude priehyb o niečo násobne väčší, keďže sa do výpočtu započítajú iné ovplyvňujúce faktory. Tretí variant môže byť preto považovaný za finálny variant, ktorý bude použitý vo finálnej simulácii celkového rámu.

5.4.3

5.4.3 Vrchná časť rámu

Na túto časť rámu bude pripevnený pneumatický valec a pákový mechanizmus. Navrhované sú štvorcové profily o rozmeroch 60x60x4 mm. Definitívne rozmery a spevnenia rámu budú až po pevnostnej analýze celého rámu, ktoré určia či je potrebná výstuž alebo navrhnuť hrubší profil.

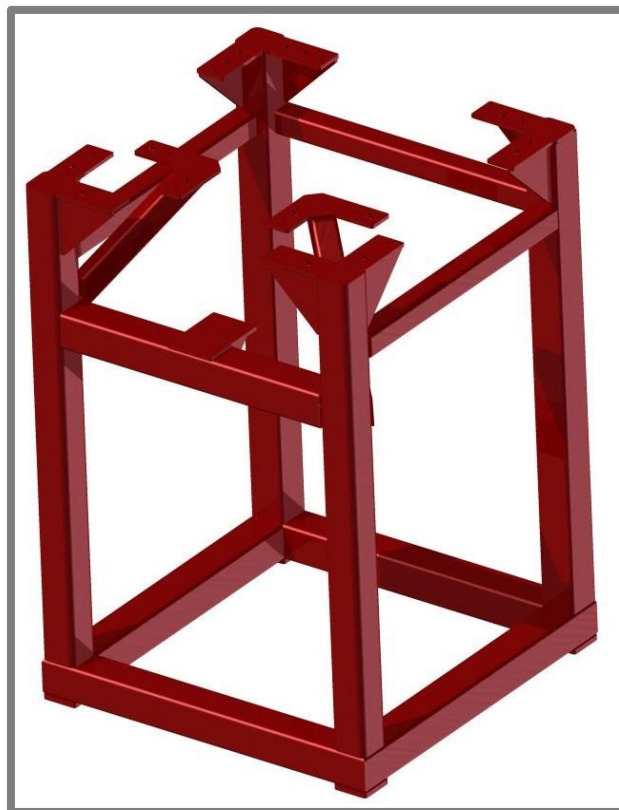


Obr. 5-40 Vrchná časť rámovej konštrukcie

5.4.4

5.4.4 Spodná časť rámu

Táto časť rámu má za účel nastaviť pracovnú vzdialenosť, vhodnú z ergonomického pohľadu. Taktiež sú na ráme zo spodnej časti privarené štvorcové plátky s vyrezanými závitmi pre nastavovacie nohy slúžiace hlavne na umiestnenie na nerovnom povrchu.



Obr. 5-41 Spodná časť rámovej konštrukcie

5.4.5 Pevnostná analýza rámovej konštrukcie

5.4.5

Bola vytvorená pevnostná analýza celej rámovej konštrukcie a to spodnej, strednej a vrchnej časti rámu. Spolu s tenzometrami a na nich položenou platňou. Jediný nadefinovaný materiál, ktorý bol použitý je konštrukčná oceľ.

Väčšina kontaktov ktoré boli nadefinované sú „bonded“. Jediný kontakt, kde je uložená podložka pod acetábulom na ohybových tenzometroch, tak bol definovaný kontakt „frictional“. Najprv bola vytvorená sieť na celú zostavu a veľkosti 10 mm na element. Následne bolo definované veľkosť elementu 5 mm na platňu acetábula, základovú platňu a ohybové tenzometre.

Následne boli definované okrajové podmienky. Reakčná sila o veľkosti 3500 N bola definovaná na platňu acetábula, presnejšie na plochu, kde je umiestnené acetábulum a taktiež na plochu kde bude umiestnený samotný pneumatický valec, z ktorého bude pôsobiť reakčná sila. Všetky stupne voľnosti boli odobraté dolným štyrom plochám na ktorých bude zariadenie sedieť na zemi. V prílohe 8 **Analýza celého nosného rámu** je vyobrazená použitá výpočtová sieť ako aj základné okrajové podmienky simulácie.

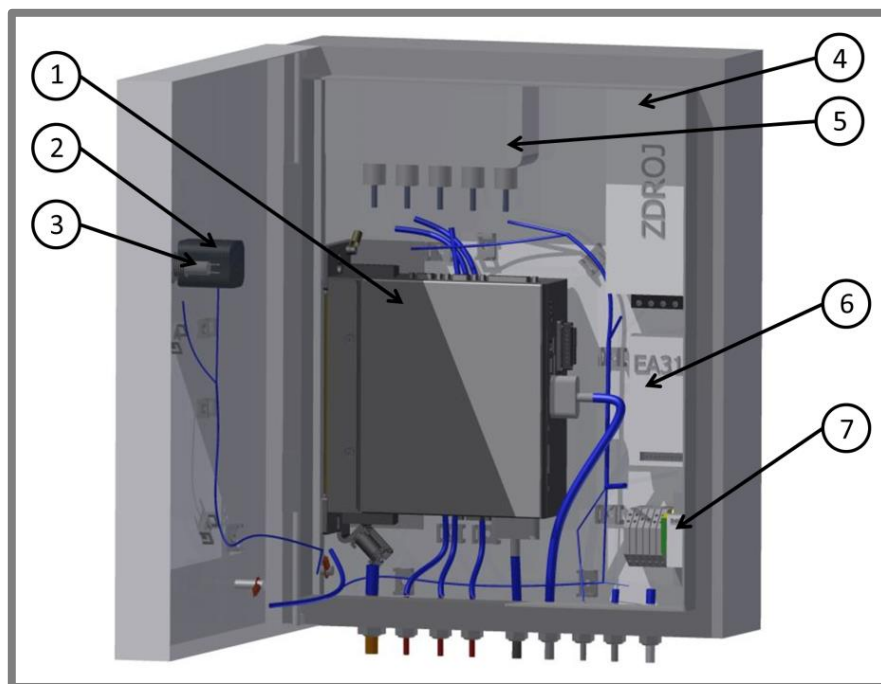
Zo simulovanej zostavy bolo potrebné zistiť hlavne priehyb platne pod acetábulom. Realizované to bolo najmä kvôli možnému rozotreniu obrazu, kde táto hodnota musela byť menšia, prípadne rovná určenej hodnote 0,08 mm.

Z dosiahnutého výsledku simulácie je vidieť, že dosiahnutá hodnota je 0,07 mm, čo je pre optickú aparatúru vyhovujúce. Výsledky pevnostnej analýzy sú priložené v prílohe 8 **Analýza celého nosného rámu**.

Kvôli vznikaníu možných frekvencií je potrebné danú zostavu podrobiť modálnej analýze a zistiť, či frekvencia 0,5 – 2 Hz môže ovplyvňovať danú zostavu natoľko, aby tam vznikali nežiaduce javy. Po vygenerovaní vlastných frekvencií simulovanej zostavy sa zistilo, že daná simulovaná zostava nadobúda kritické hodnoty až pri 16 Hz, ktoré zasiahnu hlavne namontovaný kamerový systém. V prílohe **9 Modálna analýza nosného rámu** sú vyobrazené všetky kritické frekvencie rámovej konštrukcie.

5.5 Rozvodová skriňa

Elektroinštalácia simulátora zahŕňa hlavné komponenty radenia simulátoru: PLC sa nachádza upevnené na hornom ráme, frekvenčný menič (1), zbernica tenzometrov (5), zosilňovač tenzometrov (6), napäťový zdroj (4), ochranný istič (7), hlavný vypínač (2) a signalizačná letka zapnutia (3) a vypnutia zariadenia. Je dôležité, aby boli tieto elektrické komponenty správne prepojené a taktiež, aby mali bezpečné príslušné miesto. V návrhu sa bližšie popíše, aké a prečo boli vybrané jednotlivé časti elektroinštalácie a taktiež, prečo a kde boli umiestnené dané elektrické zariadenia.



Obr. 5-42 Rozvodová skriňa

5.5.1 Návrh

PLC typu: 50E-T33GCQSNIJYJ-D 32P-SGL-R-MQX-QE bolo vybrané z dôvodu komunikácie s proporcionálnym ventilom. Zariadenie je pevne prepojené s týmto ventilom. PLC taktiež obsahuje osempanelový vstup pre zapojenie jednotlivých snímačov. Je to potrebné zaistiť výstup z nameranej sily tenzometrov. Je potrebné aby, PLC bolo napojené na napäťový zdroj o hodnote 12 V. Potrebuje zabezpečiť prístup prúdu o hodnote 2 A, potrebné na riadenia proporcionálneho ventilu a napájacích zariadení.

Frekvenčný menič bol vybraný na základe servomotora. Vybrané zariadenie by malo poskytovať dostatočný prívod napätia do motora a taktiež by malo byť možné

prepojenie s riadiacou jednotkou PLC. Prepojenie medzi PLC a frekvenčným meničom bude uskutočniteľné cez CAN vstup. Vybraný servomotor potrebuje prívod 380 V, ktoré musí zabezpečiť vybraný frekvenčný menič. Servomotor používa enkodér, aby zasielal aktuálne informácie o pozícií. Je teda potrebné, aby aj tieto údaje mohol toto zariadenie spracovať. Bol preto vybraný typ CMMP-AS-C2-3A-M0 od firmy FESTO.



Obr. 5-43 Frekvenčný menič[26]

Zariadenia na zabezpečenie údajov z tentzomberov boli vybrané a potrebnéjšie popísané v kapitole: 5.1.2 Tenzometre.

Napäťový zdroj bol vybraný na základe požadovaných kritérií nadriadených zariadení. Konkrétne je potrebné, aby bola splnená spotreba zariadenia. Jedná sa hlavne o PLC a frekvenčný menič. Frekvenčný menič požaduje vstup 12 V a zariadenie bude používať maximálne 4A. PLC požaduje taktiež 12 V a prívod maximálne 2 A. Zosilňovač tenzometrov požaduje tiež 12V. Bol preto zvolený zdroj s označením MEAN WELL SP-240-24 spĺňajúci požadované kritéria.



Obr. 5-44 Napäťový zdroj [27]

Pre bezpečnosť treba vybrať dostatočujúco silný istič, kvôli preťaženiu meniča a zabrániť tak prílivu veľkého množstva elektrického prúdu. Hranicu maxima určuje povolená hodnota z frekvenčného meniča, kde v manuáli frekvenčného meniča je doporučené použiť 6 A istič typu B2.

Na zaznamenávanie výstupu zo simulátora je potrebné mať meraciu kartu. Tá musí spĺňať hlavné požiadavky. Fundamentálna požiadavka je, aby mala napäťový vstup v rozsahu ± 10 V. Musí byť taktiež možné vyselektovať požadované informácie. Vybratá bola meracia kartu typu NI USB-6009 od firmy National Instrument. Karta bola vybraná z dôvodu dostupnosti na Ústave konštruovania a splnením požadovaných kritérií. National Instrument poskytuje možnosť vytvoriť vlastný záznamový program vo vývojovom prostredí LabView.

Výber hlavného vypínača bol obmedzený iba tým, aby bol jednoúrovňový, čo znamená, aby mal iba pozíciu zapnutá alebo vypnutá. Zároveň, aby mal v sebe už istič kvôli tomu, aby sa do zariadenia nedostalo viac prúdu ako potrebujeme. Vypínač sa musí dať namontovať na rozvodovú skriňu.

V poslednom rade je potrebné vedieť, kedy je zariadenie zapnuté a kedy vypnuté. K tomu nám slúži signalizačná letka. Parameter na splnenie je prevádzka pri 230 V a taktiež, aby ju bolo možno nainštalovať na rozvodovú skriňu.

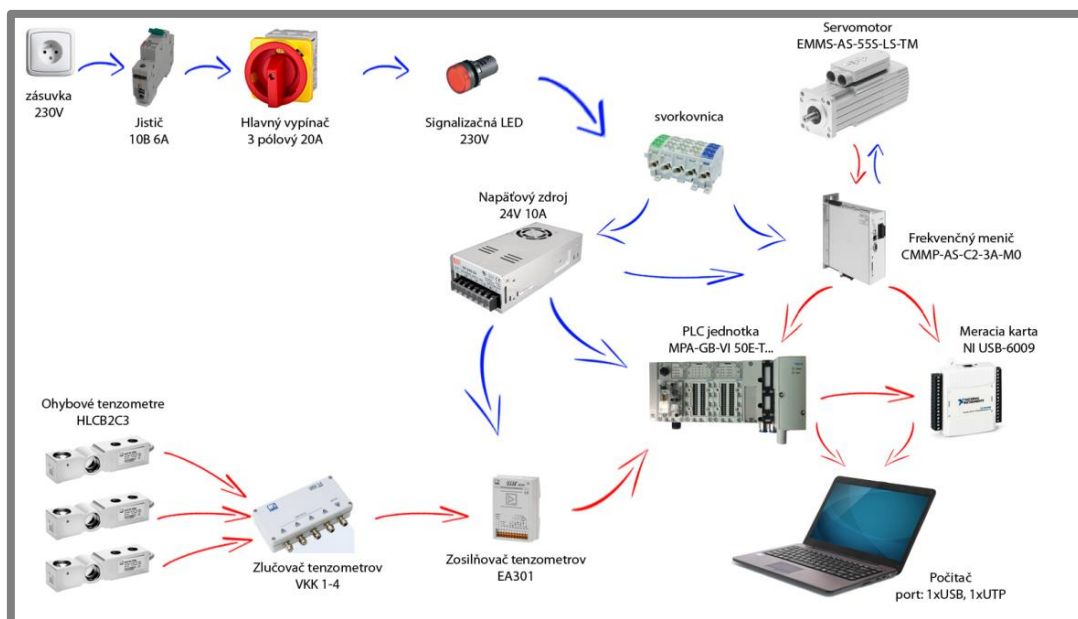
5.5.2 Schéma zapojenia

Na začiatku zapojenia musí byť použitý spomínaný istič. Ten je následne prepojený na hlavný vypínač zariadenia. Kvôli zisteniu stavu zapnutia alebo vypnutia je priložená do obvodu aj signalizačná LED dióda. Z hlavného vypínača vedie rozvod do svorkovnice, kde sa rozdelí na dve časti.

Prvá časť ide do frekvenčného meniča a druhá ide do napäťového zdroja. Z frekvenčného meniča sme je zapojený napájacím a enkodrovým káblom do servomotora. Z napäťového zdroja vychádza požadované 12 V napätie, ktoré sa rozdeľuje do frekvenčného meniča, do PLC riadiacej jednotky a do zosilňovača tenzometrov.

Tri tenzometre sú spojené v zariadení VKK1-4 z ktorých je následne prepojený so zosilňovačom. Hodnota zo zosilňovača je postupne privedená do svorkovnice, kde sa rozdeľuje na dve časti. Jedna časť ide do PLC riadiacej jednotky a druhá časť ide do meracej karty USB-6009. PLC riadiaca jednotka je spárovaná s frekvenčným meničom prostredníctvom portu CAN. Z frekvenčného meniča sú vytiahnuté dva napäťové údaje definované v zariadení. Tieto dve veličiny sú následne pripojené do meracej karty.

Do počítača sa následne napojí USB výstup z meracej karty a UTP káblom sa napojí riadenie PLC jednotky. V počítači je možné sa na PLC zariadenie napojiť pomocou webového rozhrania a záznam z meracích kariet získať z vytvoreného programu v Labview. V priloženej prílohe 10 **Schéma elektrického zapojenia** je podrobnejšie zobrazené prepojenie všetkých elektrických zariadení v simulátore.



Obr. 5-45 Schéma zapojenia elektrických častí zariadenia

5.6 Programovacia podpora

5.6

Na simulátore je dôležitá taktiež softvérová podpora, zabezpečujúca obsluhu zariadenia ako aj samotné riadenie pohybov, cyklov a ďalších činností. Je potrebné, aby boli naprogramované tri zariadenia. PLC, v ktorom musí byť zostavený software, zabezpečujúci užívateľské rozhranie a ktorý bude posielať zadané údaje do portov frekvenčného meniča. Taktiež musí byť samostatne nastavený frekvenčný menič, no bez vývojového prostredia. Na záver musí byť vytvorený užívateľský program, v ktorom môžeme zaznamenávať namerané veličiny, ako aj ukladať zadané namerané dáta.

5.6.1 PLC

5.6.1

PLC programovaciu jednotku je najskôr potrebné nastaviť v konfiguračnom programe CPX Festo Maitance Tool. Následne je nutné v užívateľskom programe CODESYS V3.5 vytvoriť zdrojový kód funkcií ako aj užívateľskú vizualizáciu pre používateľa.

POZOR!!! Chybná pozice motoru!!!
Nutno nastaviť ve FCT!!! **Projekt: Simulátor kloubu**

Nastavení pohonu

Enable

Start cyklu

Reset systému

Motor + Motor -

Prítlak + Prítlak -

Poz. počet cyklu:

Poz. počet zaznamu:

Interval (ms):

Akt. síla (N):

Akt. pozice:

Akt. tlak (mBar):

Faktor tenzometru:

Faktor N / mBar:

	Pozice pohonu (°)	Síla prítlaku (N)	Rychlost pohonu (%)
Záznam c.1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.6	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.7	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.8	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.9	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.10	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.11	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.12	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.13	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.14	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.15	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.16	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.17	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.18	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.19	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.20	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Obr. 5-46 Grafické rozhranie pre používateľa

Užívateľské prostredie sa skladá z tlačidiel a zo zadávacích polí. Tlačidlo „Enable“ zapína celú PLC jednotku a po zapnutí zariadenia vydáva jemne piskľavý zvuk. Tlačidlo „Štart cyklus“ spúšťa zadaný cyklus. Tlačidlo „Reset systému“ sa vyresetuje na aktuálny počet cyklov, ako aj aktuálny kontrolný bod. Tlačidlo je nutné stlačiť pred každým novým štartom.

V prvom boxe sa zapíše počet cyklov. Vo vedľajšom boxe sa zobrazuje aktuálny cyklus. Pri počte kontrolovaných bodov sa zadáva počet použitých riadkov a vedľajší box zobrazuje aktuálne prebiehajúci cyklus.

Následne hodnoty: interval, akt. síla, akt. pozice, akt. tlak, faktor tenzometru, faktor N/mBar, sú iba informačné údaje, udávajúce aktuálne zadané hodnoty.

V strede webovej aplikácie sú tri stĺpce, do ktorých sa zadávajú hodnoty pre pokyny, ako je síla, pozícia a rýchlosť.

5.6.2 Frekvenčný menič

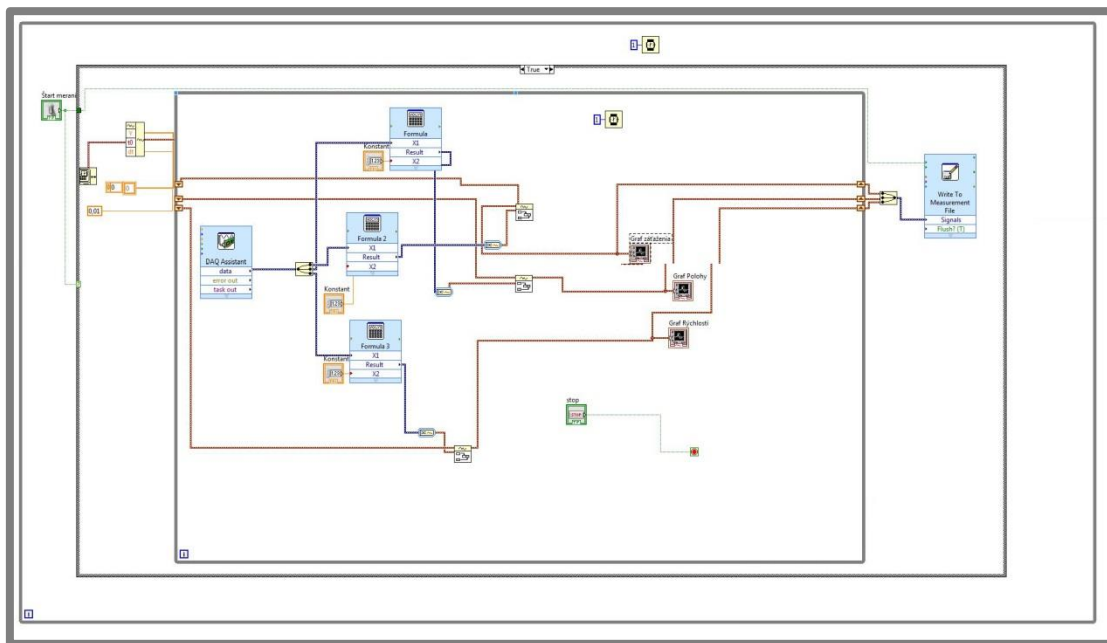
Frekvenčný menič musí byť zvlášť nakonfigurovaný z dôvodu nastavenia požadovaného motoru a vyžadovaného prevodového pomeru prevodovky. Taktiež sa musia nastaviť krajné hodnoty systému ako je maximálna rýchlosť, maximálne zrýchlenie a spomalenie. V konfigurácii sa musí nastaviť aj začiatková pozícia, a prípadné prehrievania motora, od ktorej sa bude uberať naprogramované PLC.

5.6.3 Meracia karta

V poslednom rade je potrebné, aby bol vytvorený užívateľský program pre zobrazenie a ukladanie záznamu z meracích kariet. Použité boli meracie karty od spoločnosti National Instrument. V dispozícii je užívateľské prostredie Labview, ktoré umožňuje si naprogramovať pre meranie individuálne užívateľské prostredie.

Schéma zapojenia

Na obrázku nižšie je vidieť grafickú schému štruktúry programu. Hlavný cyklus je tvorený základným cyklom, ktorý sa opakuje každú 1 ms. Zároveň je podmienka zastavenia tohto cyklu stlačením tlačidla *vypnúť program*. Následne je v cykle ďalší cyklus, ktorý vyhodnocuje, ak je tlačidlo *zapnutie merania* zapnuté alebo vypnuté. Následne cyklus ukladá vstupné a výstupné dáta z posledného cyklu. Na začiatku sú vstupné dáta nulové a výstup tvorí zbernica dát, ktoré sú následne namerané údaje zapíše do Excelu a to pomocou funkcie „Write to Measurement File“. Nasleduje samotné jadro celej aplikácie. Prvok „DAQ Assistant“ je podporný prvok od firmy National Instrument pre vstupy a výstupy z meracích kariet, bez ohľadu nato, či je analógové alebo digitálne. V tomto komponente sú definované tri analógové vstupy, nadobúdajúce novú hodnotu každých 10 ms. Výstup z jednotky je následne rozdelený na tri cesty z dôvodu zadania potrebných konštánt pre spracovanie údajov. Konštanty sú definované a určené už z vychádzajúcich zariadení. Po prepočte hodnôt sú privedené do jednotlivých grafov, kde sú vykreslené a zároveň sú privedené ako spätné hodnoty daného cyklu. Je to navrhnuté, aby bolo možné ich použiť po skončení merania do bloku „Write to Measurement File“. Meranie je zastavené po stlačení tlačidla *stop merania*.

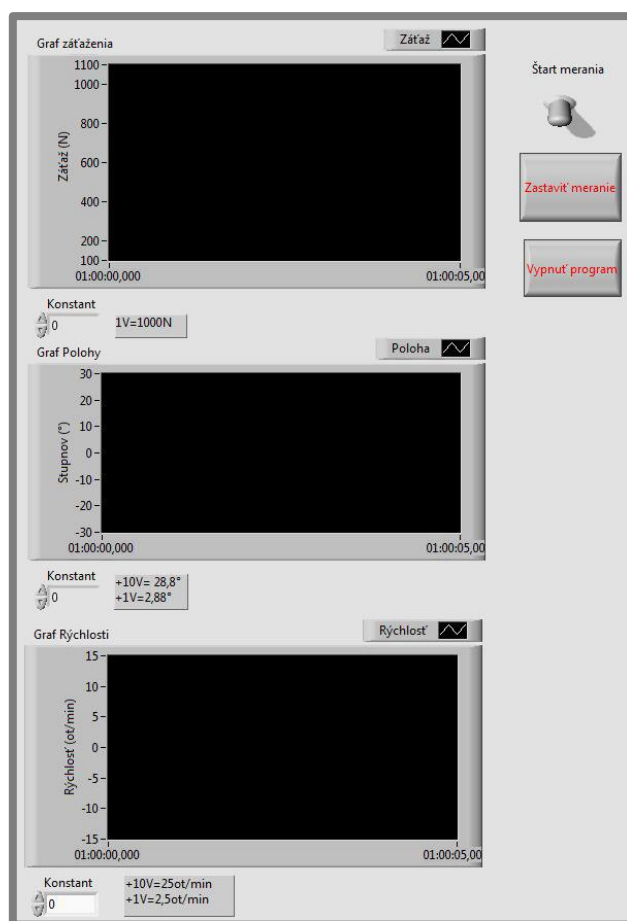


Obr. 5-47 Schéma programu v LabView

Grafické rozhranie

Vytvorené bolo grafické rozhranie, obsahujúce tri tlačidlá: Štart merania, Zastaviť meranie, Vytnúť program. Program obsahuje tri grafické vykresľovania meraných údajov a tri zadané konštanty prepočítavajúce výstupné hodnoty z meracej karty.

Ovládanie programu je po zapnutí aplikácie v Labview. Ak je meracia karta zapojená v USB porte a je funkčná, tak po zapnutí tlačidla *štart merania* sa začnú zobrazovať aktuálne merané veličiny.



Obr. 5-48 Uživatelské rozhranie

5.7

5.7 Cenová rozvaha

V tabuľke 5-1 je uvedená cenová relácia osobitných častí simulátora. Kompletná cenová rozpiska jednotlivých nakupovaných častí je priložená v prílohe 1 **Cenová rozvaha**.

Tab. 5- 1 Všeobecný prehľad použitých financií

Komponenty	Celková cena s DPH
Servomotor, prevodovka, pneu. valec, PLC od FESTA	216 265,- Kč
Ohybové tenzometre, zosilňovač, zbernica od HBM	54 523,- Kč
Lineárne vedenia a domčeky, lineárna plošina od MISUMI	25 419,- Kč
Výroba dielov vo firme WINSTON	39 325,- Kč
Výroba rámovej konštrukcie	37 800,- Kč
Ložiská, puzdra, aretácia a spojovací materiál	5 373,- Kč
Elektroinštalácia	5 680,- Kč
Celková cena s DPH	384 385,- Kč

5.8 Úvodné testovacie meranie

5.8

Pre overenie chodu simulátora bol urobený skúšobný test zariadenia. Pre porovnanie výsledkov bol vytvorený test, ktoré by bolo možné porovnať so súčasným simulátorom bedrového kĺbu s názvom Kyvadlo. Je teda potrebné nastaviť požadované podmienky na simulátore. Budú popísané podmienky, výsledky a ich zhodnotenie.

5.8.1 Podmienky merania

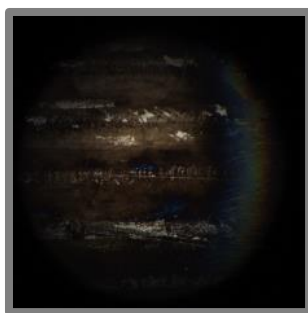
5.8.1

Rozsah náklonu bol $\pm 16^\circ$ pri záťaži 530 N. Frekvencia jedného celého cyklu bola definovaná na 2 sekundy. Meranie bude prebiehať 230 sekúnd. Použitá kĺbová jamka a kĺbová hlavica o priemere 28 mm. Acetábulum bolo vyhriate pomocou výhrevných patrónov na teplotu 37°C . Použité bolo 5ml hovädzieho séra, ktoré sa hodinu a 20 minút rozmrazovalo. Po uvedenej dobe bolo sérum použité. Použitá bola optická aparátúra s nasledujúcimi parametrami. Objektív s päťnásobným zväčšením s pracovnou vzdialenosťou 23,5 mm. Na pozorovanie hrúbky mazacieho filmu bola použitá vysokorýchlostná kamera Phantom 710V. Snímací obraz bol 656 x 656 pixlov v programe PCC.

5.8.2 Pracovný postup merania

5.8.2

Najprv bolo potrebné namontovať všetky potrebné komponenty na zariadenie, ako je kamera, objektív, svetlo. Po úspešnom namontovaní bola nutná kalibrácia farebnej škály farieb. Prevedená bolo prostredníctvom programu Achilles. Nasledovalo upevnenie kĺbovej hlavice do osi rotácie kývavého hriadeľa. Kalibrácia bola prevedená s navrhnutým prípravkom. Po vystredení hlavice bola premeraná hodnota s mikrometrom o presnosťou 0,01 mm. Po ustálení hlavice bolo potrebné nájsť požadovaný kontakt v snímanom obraze. Pri hľadaní kontaktu bola pôsobiaca sila iba samotná váha celého systému, čo činí približne 20 kg. Po úspešnom nájdení kontaktu prebiehalo testovanie všetkých systémov naprázdno. Spustená bola simulácia v rozsahu $\pm 16^\circ$ náklonu pri nulovej záťaži. Pri tomto teste sa pozorovalo, či daný kontakt sa pohybuje alebo je stále na mieste. Úvodné meranie mohlo byť zahájené až vtedy, ak pri nulovej polohe zariadenia bolo dostatočne vidieť kontakt.

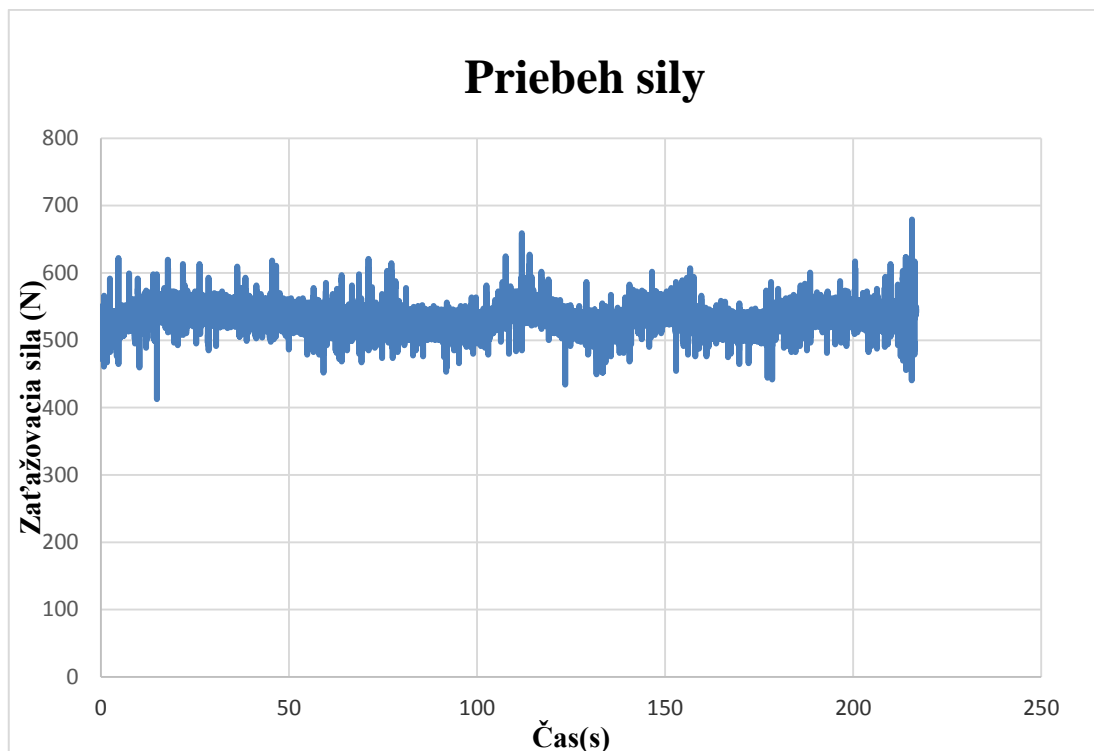


Obr. 5-49 Snímaní kontakt

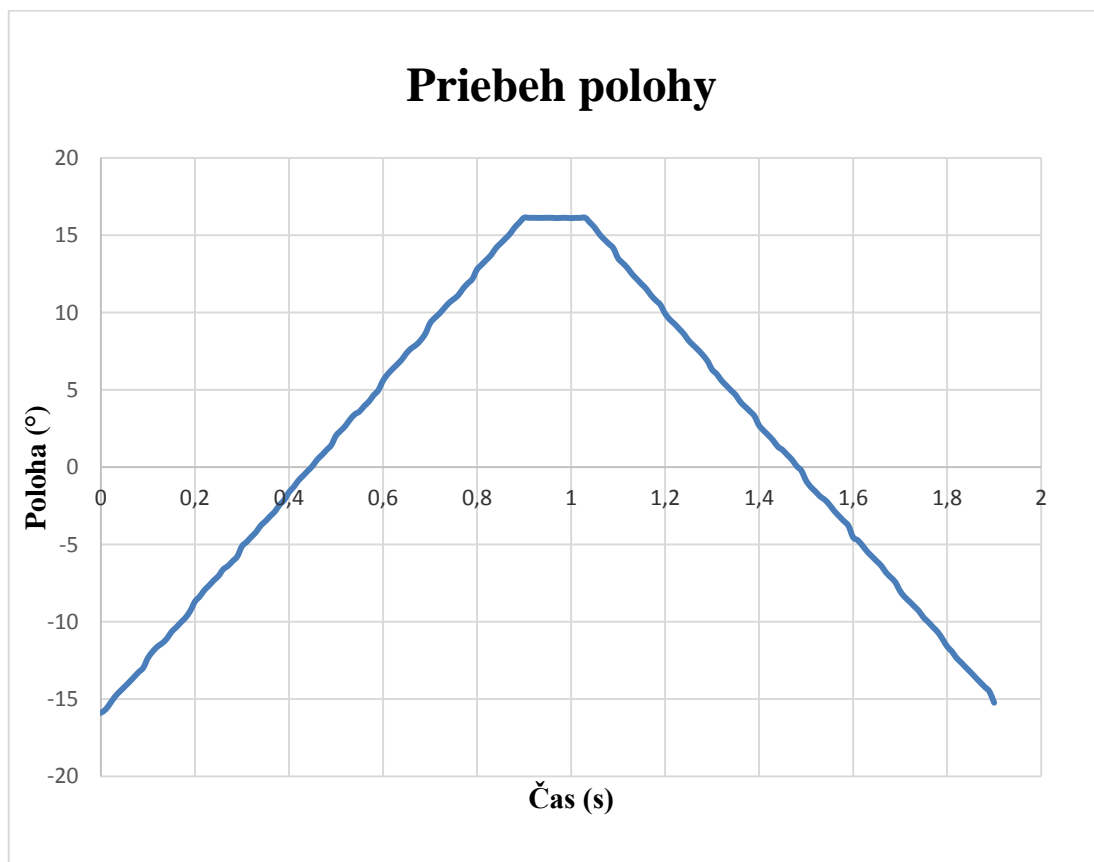
5.8.3 Namerané výsledky

5.8.3

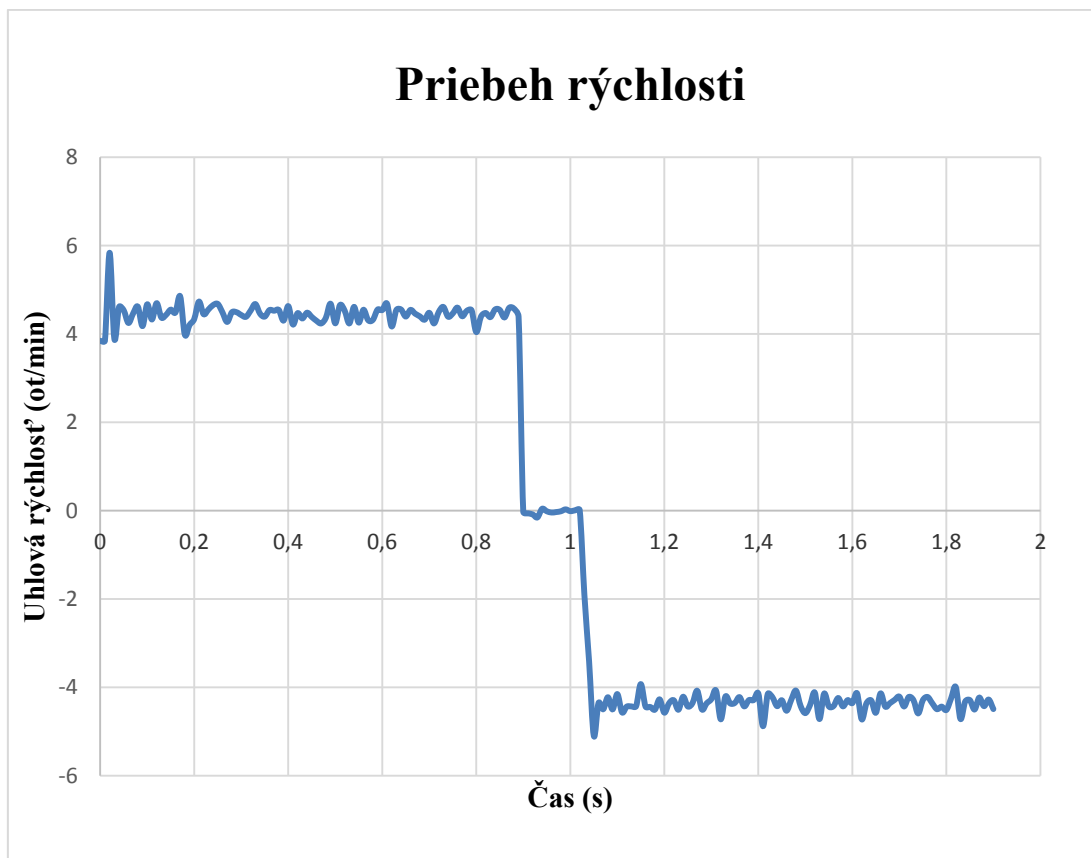
Bolo zaznamenaná sila, poloha a rýchlosť. Bol spracovaný aj graf na záznam veľkosti sily v rovnovážnej polohe 0° . Vyhodnotenie údajov z vysokorýchlostnej kamery a prepočet na hrúbku mazacieho filmu vyhodnotil Ing. Filip Urban.



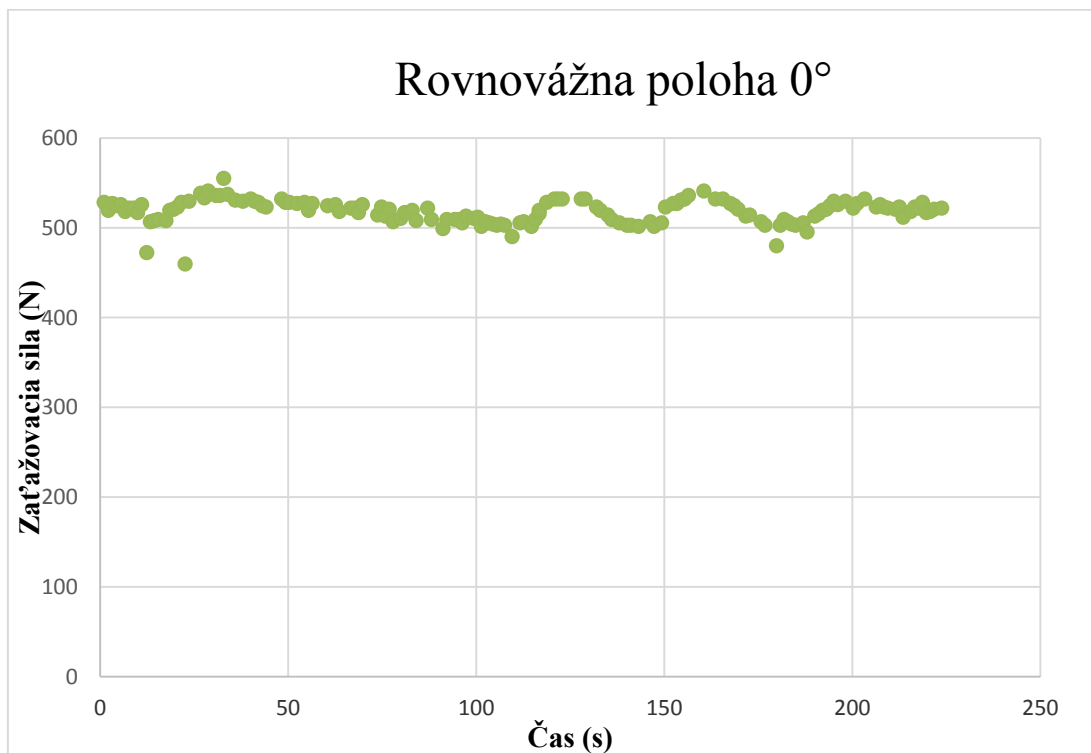
Graf 5- 1 Priebeh záťažovej sily



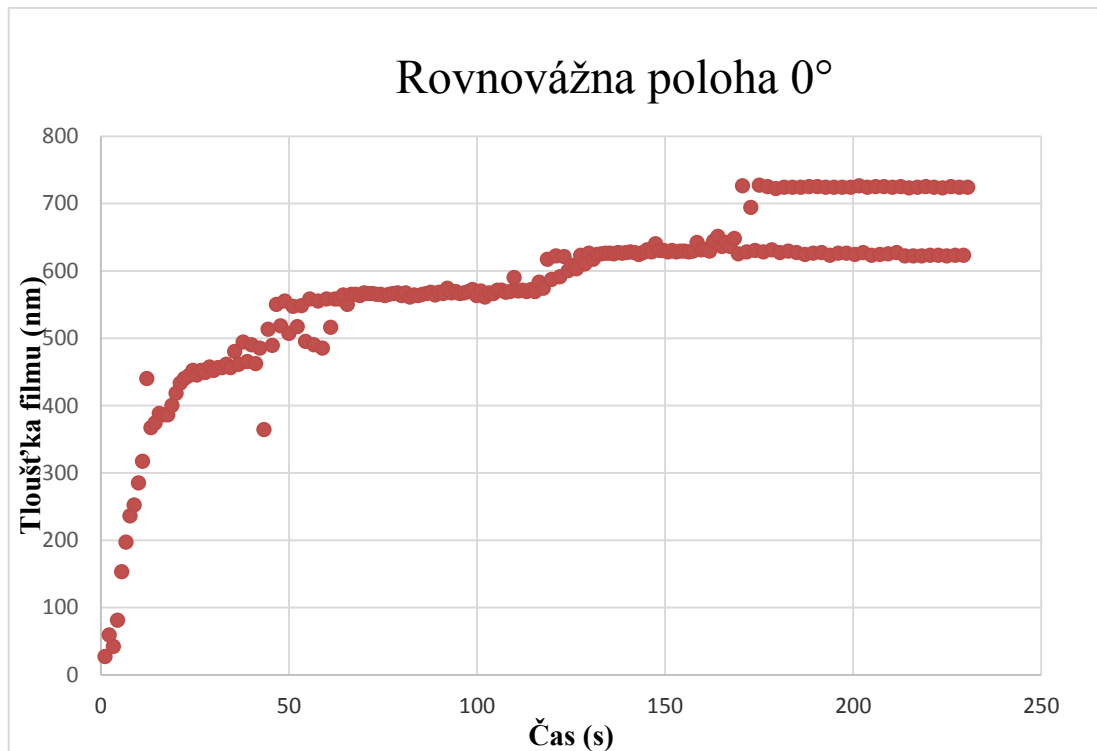
Graf 5- 2 Dráha pohybu kývavého rámu



Graf 5- 3 Priebeh rýchlosti



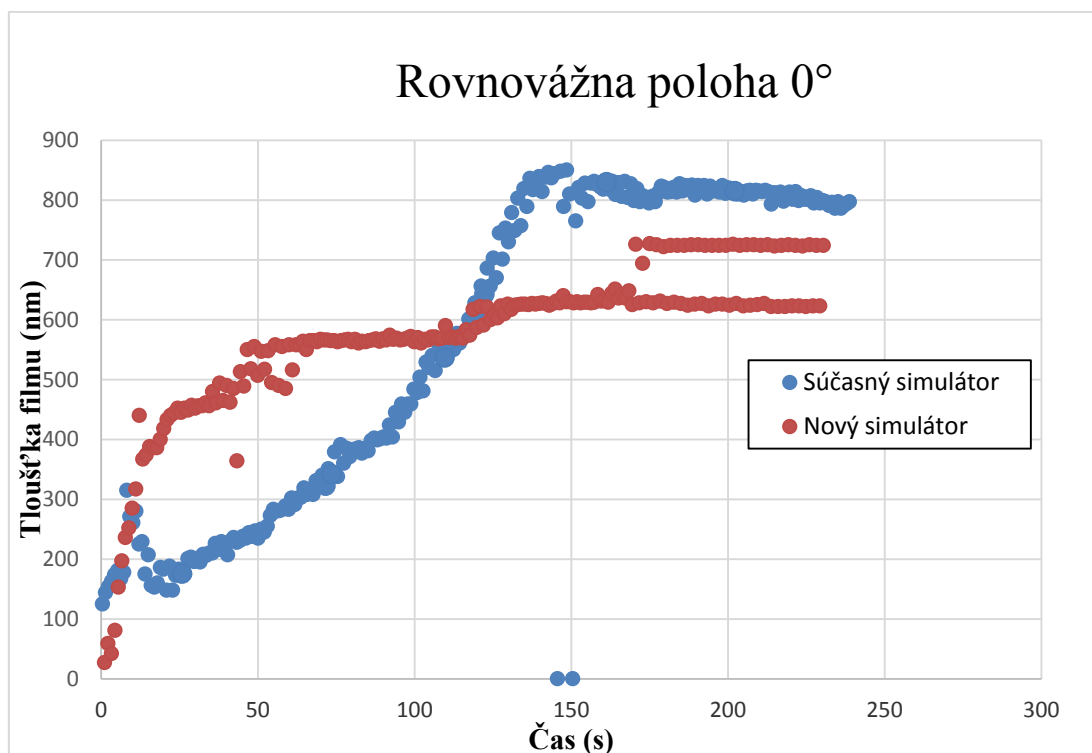
Graf 5- 4 Veľkosť zaťažovacej sily v rovnovážnej polohe 0°



Graf 5- 5 Priebeh hrúbky mazacieho filmu pri každej rovnovážnej polohe 0°

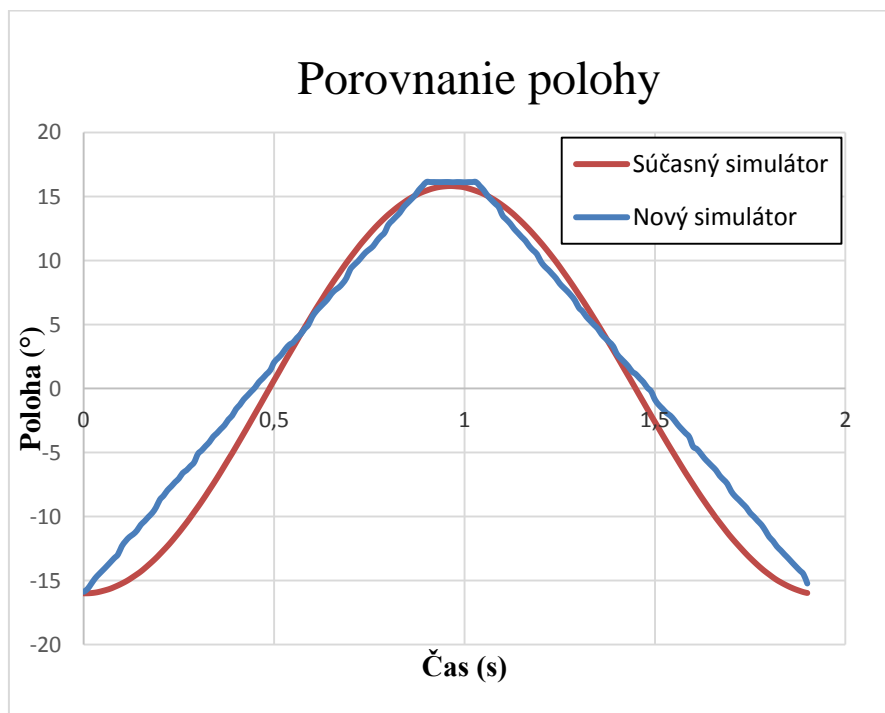
5.8.4 Zhodnotenie

Na porovnanie nameraných údajov sa vychádzalo z nameraných hodnôt súčasného simulátora. Zo súčasného simulátora je možné získať údaje o rýchlosti a snímok vytvorené vysokorýchlostnou kamerou. Údaje o hrúbke mazacieho filmu zo súčasného simulátora boli použité z diplomovej práce Ing. Jana Bartošíka [29], kde boli použité podobné počiatočné podmienky.

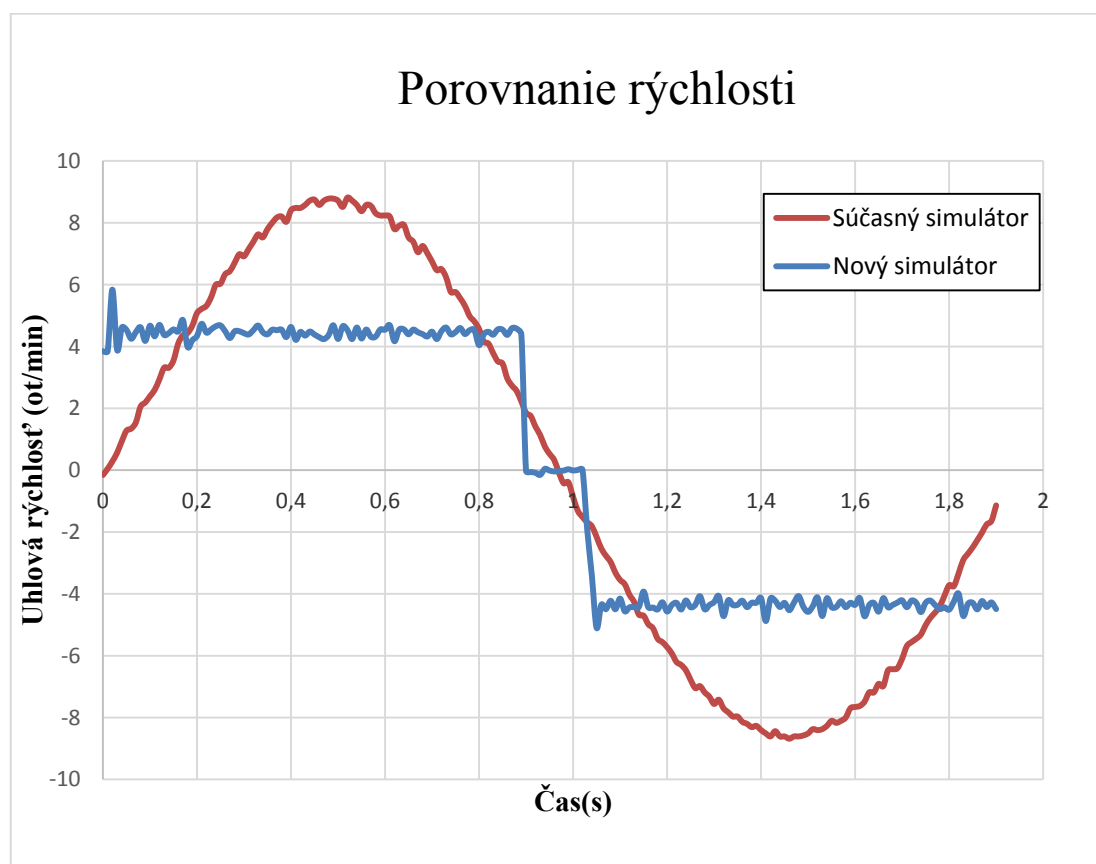


Graf 5- 6 Porovnanie výsledok zo súčasným simulátorom

Z grafu 5-6 je vidieť, že hrúbka filmu má odlišný priebeh ako u súčasného kyvadla. Predpokladalo sa však že hrúbka filmu u nového simulátora bude menšia ako u súčasného, lebo bola použitá väčšia priemerová vôľa medzi hlavicou a jamkou acetábula. To že sa priebehy líšia, môže mať za následok opotrebenie skúšanej hlavice. Taktiež aj odlišná rýchlosť a priebeh pohybu, ako je vidieť na grafoch nižšie.



Graf 5- 7 Porovnanie priebehu naklonu



Graf 5- 8 Priebeh porovnania rýchlosti

Na priebehu polohy a rýchlosti je vidieť odlišnosť medzi súčasným zariadením. Z dôvodu možnosti zadávania u servomotora iba konštantné hodnoty rýchlosti. Keďže vybraná PLC riadiaca jednotka nemá možnosť zadávať interpólový priebeh do motora.

Nie je možné však preveriť veľkosť záťaže pri testovaní na súčasnom zariadení. Tento fakt môže mať najväčší dopad na odlišnosť vyššie uvedených výsledkov. Na Grafe 5-4 je možné vidieť, že pôsobiaca sila sa niekedy vychýľuje od požadovanej hodnoty o 30N. Kde pri súčasnom simulátore nevieme potvrdiť, že v rovnovážnej polohe je uvedená sila 532N.

6 DISKUSIA

Výsledkom predloženej práce je funkčné experimentálne zariadenie simulátora bedrového kĺbu, ktoré sa bude primárne využívať na pozorovanie hrúbky mazacieho filmu pomocou metódy interferometrie. Sekundárne sa bude používať na dlhodobé opotrebenia umelých kĺbových náhrad. Zariadenie je nadimenzované na silový rozsah 200 N až 3000 N. Používaný pneumatický valec dokáže vyvinúť silu až 7000 N. Zariadenie vie simulovať kývavý pohyb flexia - extenzia v rozsahu $\pm 25^\circ$ ako je definované ISO normou pre simulácie pohybu kĺbových náhrad. Výstupom zo zariadenia sú aktuálne záznamy údajov snímaných veľkostí zaťaženia, poloha náklonu motora a rýchlosť rotácie motora. Uvedené hodnoty sú zaznamenané z meracej karty a prenesené do užívateľskej prostredia LabView.

Počas montáže sa vyskytlo pár jednotlivých chýb, ktoré obmedzili možnosti zariadenia. Prvý problém nastal pri zváraní konštrukčného rámu. Pri návrhu konštrukcie sa zabudlo, že ak sa stredná časť rámu priskrutkovala k L-kovej prírubke, na ktorej sa následne navarili spodné nohy spolu s jedným podporným ramenom, tak po rozobraní tejto spodnej časti sa časť skrútila. Nebolo možné komponent vrátiť do pôvodného stavu. Navrhnutými boli kvôli tomu ďalšie tri podperné nosníky, tak aby ničomu neprekážali a aby po rozobratí spodnej časti nenastala deformácia.

Počas prvých pokusov upevnenia optickej aparatúry s definovanou optikou sa zistilo, že bola zle plánovaná pracovná vzdialenosť opticky. Namiesto plánovaných 45 mm mala optika iba 25 mm pracovnú vzdialenosť. Čo znamenalo, že pri samotnom teste by nebolo na obraze záznamu nič vidieť. Nutné bolo navrhnuť nové riešenie a posunúť daný objektív aspoň o 20 mm k miske acetábula. Nové riešenie spočívalo vo výmene aktuálnej opticky s označením 4x/0,10 160/25 za optiku označením 4x/0,15 ∞ /23,5, ktorá bola dostupná na Ústave konštruovania. Keďže bol použitý mikroskop, na ktorom mala byť už od začiatku použitá optika s nekonečnou vzdialenosťou a aktuálne sa využívala optika s 160 mm vzdialenosťou mohla byť nahradená spomínanou optikou nazývanú „nekonečnou“ so vzdialenosťou predstavenú 200 mm. Zároveň bolo možné vytvoriť redukciu na predĺženie optiky o spomínaný rozdiel 20 mm. V dielňach Ústavu konštruovania bola vyrobená redukcia, ktorá predĺžila posun objektívu až o 30 mm. Zabezpečilo to možné predĺženie daného objektívu. Po nasadení nekonečnej optiky s redukciou už mohol byť kontakt pre optiku viditeľný.



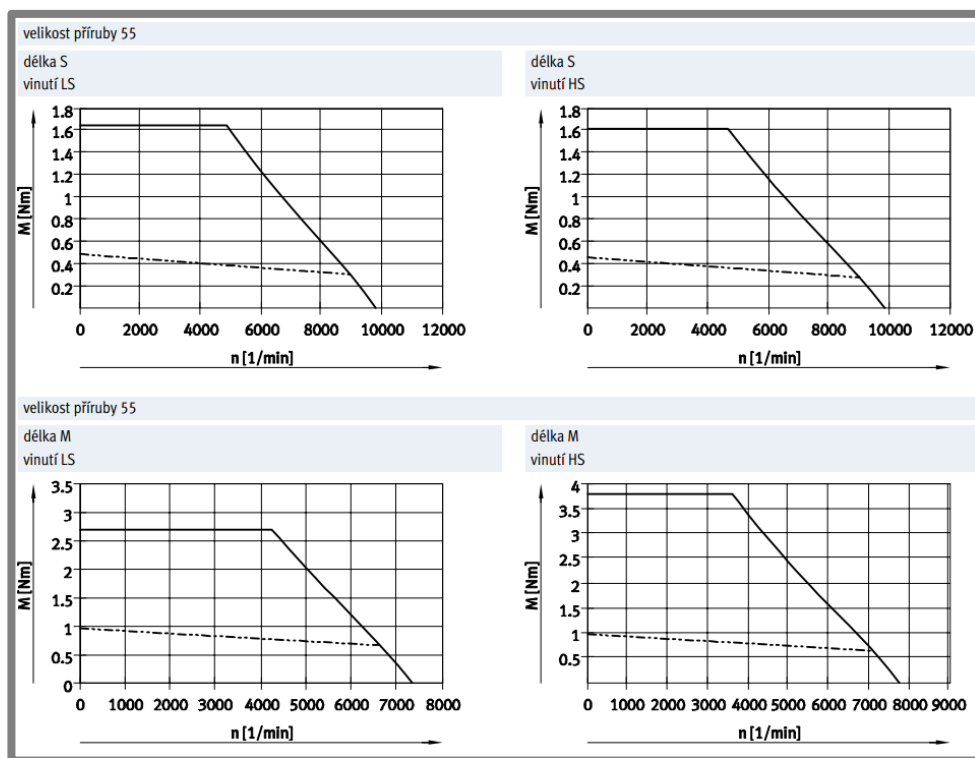
Obr. 6-1 Detail na predĺženie objektívu

Ďalšia chyba sa zistila pri vystred'ovaní kĺbovej hlavice. Pri návrhu vystred'ovacieho prípravku sa zabudlo prejsť prípravku celým priemerom kĺbovej hlavice. Potrebné bolo urobiť menšiu úpravu v geometrii prípravku. Spočívalo to v zarovnaní tanierikov z jednej strany o 5 mm, aby bolo možné daný prípravok nasadiť a použiť.



Obr. 6-2 Úprava prípravku

Nasledujúcim zisteným nedostatkom bol výber zlého servomotora. Návrh motora bol vytvorený na základe parametrov zo starého katalógu konkrétne z roku 2007 od firmy FESTO, kde na prelome roku 2010 robila firma zmenu označenia z S na M. Spôsobilo to, že bol vybraný slabší motor, ktorý mal iba polovičný výkon ako motor, ktorý bol vybraný na základe výpočtov. Zrealizovať reklamáciu zo strany FESTO však nebolo reálne. No motor bol nadimenzovaný 1,75-násobne, preto zakúpený motor môže byť do určitej miery použitý a nemusí byť zakúpený nový. Problém sa môže ukázať až pri skúšaní dlhodobých testov umelých bedrových kĺbov, kde ak bude použitá záťaž väčšia ako je 2500 N, môže nastať situácia, že sa bude motor po určitej dobre prevádzky prehrievať. Používať sa bude v rozsahu nad menovitou záťažou, avšak nie až nad špičkovou záťažou motora. Situácia je riešiteľná iba zakúpením nového motora s označením EMMS-AS-55-M, keďže daný motor má parametre rovnaké, líši sa iba výkon a dĺžka, ktorá by vyhovovala. Bola by prevedená iba výmena motora a taktiež by bolo potrebné urobiť systémovú zmenu vo frekvenčnom meniči s doplnením väčšej váhy na protizávažie.



Obr. 6-3 Motorová charakteristika vybraného motoru [28]

Chyba bola zistená aj pri samotnom prvom testovaní zariadenia. Vybraná PLC riadiaca jednotka nemá možnosť definovať riadiaci motor interpólovo, čo má za následok, že nie je možné plynulé spomaľovanie motora. Vyskytujú sa tým pádom medzi jednotlivými krokmi časové meškania. Potrebným bolo vymyslieť nové webové rozhranie, ktoré je možné vidieť na nižšie uvedenom obrázku. Spomínané webové rozhranie bolo vytvorené na základe nových skúseností po samotnom úvodnom meraní a taktiež sa zistilo, že motor nemôže riadiť motor interpólovo. Nový návrh umožňuje definovať iba dva body náklonu - krajné hodnoty z jednej a druhej strany. Kontrolné body pracujú spôsobom, že ak motor docielí zadanú súradnicu motora, tak sa zadá do proporcionálneho ventilu požadovaná sila prepočítaná na mBar.

Do budúcnosti by bolo doporučené preveriť dĺžku chodu motora pri dlhodobých testoch a zistiť, kedy sa bude vybraný motor prehrievať. V prípade potreby zároveň objednať vyššie spomínaný motor. Taktiež, ak bude zhotovené a nahrané nové webové prostredie do PLC riadiacej jednotky, tak je potrebné vyskúšať, ako presne dokáže simulátor obkresliť spomínanú zaťažovaciu ISO krivku flexia - extenzia. Pri úvodnom meraní bolo zistené veľmi zložité nastavovanie kĺbovej misky a hľadanie kontaktu medzi kĺbovou hlavicou a kĺbovou jamkou. Preto by bolo dobré, ak by bol vymyslený mechanizmus na jemné ladenie polohy kĺbovej misky pre jednoduchšiu prácu na zariadení. Tiež z úvodného merania sa zistil odlišný priebeh hrúbky mazacieho, kde veľkú váhu v nezhode údajov môže mať zaťažovacia sila. Keďže sa nevie porovnať sila zo súčasného simulátora. Bolo by preto potrebné preveriť namerané údaje na zariadení, v ktorom je tiež zaznamenávaná pôsobiaca sila.

POZOR!!! Chybná pozice motoru!!!
Nutno nastaviť ve FCT!!!

Nastavení pohonu

Počet cyklov:

Počet kontrolních bodov:

Interval (ms):

Akt. síla (N):

Akt. pozice:

Akt. tlak (mBar):

Faktor tenzometru:

Faktor N / mBar:

Kalibrácia zariadenia

Pozícia

(°)

Prítlak

(N)

Rychlost

(%)

Simulátor bedrového klbu

Rozsah kývania (°)

Rýchlosť (%)

Kontrolné body

	Pozícia (°)	Sila prítlaku (N)
Záznam c.1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.3	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.4	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.5	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.6	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.7	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.8	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.9	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.10	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.11	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.12	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.13	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.14	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.15	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.16	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.17	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Záznam c.18	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Obr. 6-4 Nové užívateľské rozhranie PLC jednotky

7 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá návrhom a realizáciou experimentálneho zariadenia na pozorovanie hrúbky mazacieho filmu metódou interferometrie, kde optická aparatúra je zložená z vysokorýchlostnej kamery, mikroskopu a objektívu. Experimentálne zariadenie bude zároveň určené na skúmanie opotrebenia umelých bedrových kĺbov. Zariadenie umožňuje dynamicky meniť záťaž v rozmedzí od 200 N do 3 000 N pri náklone $\pm 25^\circ$ pri teoretickej frekvencii 1 Hz obmedzenou hlavne samotným proporcionálnom ventilom.

Diplomová práca obsahuje prehľad súčasného stavu poznania, v ktorej sú popísané určité typy doterajších simulátorov bedrových kĺbov. Všetky opísané zariadenia obsahujú popis samotnej konštrukcie s limitmi a princípmi merania. Následne sú v práci zhodnotené poznatky na základe rešeršnej časti, hlavne z konštrukčného hľadiska. Ďalej sa práca venuje konštrukčným variantom, ktoré sú popísané a následne uvedené ich výhody a nevýhody. Po zhodnotení a vybraní vhodnej konštrukčnej varianty je v kapitole konštrukčnej časti podrobne popísaný finálny variant. V riešení je okrem samotného popisu konštrukcie uvedený návrh, realizácia a programovanie jednotlivých elektrokomponentov, nevyhnutných na chod samotného zariadenia. Taktiež je v uvedenej kapitole popísané jednotlivé užívateľské softwarové prostredie. V samotnom závere tejto kapitoly je definovaný úvodný overovací experiment zariadenia a jeho stručné zhodnotenie a porovnanie s už používaným zariadením. Záverečnou kapitolou práce je diskusia. V nej sú zhodnotené všetky výsledky vzhľadom ku stanoveným cieľom, ako aj všetky problémy, ktoré sa udiali počas samotnej montáže zariadenia. Uvádzané sú následné riešenia vyskytnutých problémov. V samotnom závere kapitoly sú podotknuté nadchádzajúce smery výskumu, prínosy uskutočnenej a budúcej práce doporučené samotným autorom.

Výsledkom diplomovej práce je funkčný výrobok simulátora bedrového kĺbu. Primárne bude slúžiť na skúmanie hrúbky mazacieho filmu pomocou metódy interferometrie. Sekundárne bude jeho využitie na skúmanie opotrebenia umelých bedrových náhrad pri dlhodobých testoch. Funkčnosť zariadenia bola overená úvodným experimentom. V súčasnosti je zariadenie umiestnené na Ústave konštruovania na Fakulte strojného inžinierstva Vysokého učenia technického v Brne.



Obr. 7-1 Simulátor bedrového kĺbu

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] M. Flannery, E. Jones, C. Birkinshaw, Analysis of wear and friction of total knee replacements part II: Friction and lubrication as a function of wear, *Wear*, č. 265, roč. 7–8, 20 September 2008, s. 1009-1016, ISSN 0043-1648, Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.023>.
- [2] GALLO, Jiří, Martin HARTL, Martin VRBKA, Tomáš NÁVRAT a Ivan KŘUPKA. What Should an Orthopaedic Surgeon Know about Biotribology Strana 59 of Total Hip Arthroplasty. *ACTA CHIRURGIAE ORTHOPAEDICAE ET TRAUMATOLOGIAE ČECHOSLOVACA*. 2013, roč. 80, č. 6.
- [3] TEEPLE, E., B.C. FLEMING, A.P. MECHREFE, J.J. CRISCO, M.F. BRADY a G.D. JAY. Frictional properties of Hartley guinea pig knees with and without proteolytic disruption of the articular surfaces. *Osteoarthritis and Cartilage*. 2007, roč. 15, č. 3, s. 309-315. DOI: 10.1016/j.joca.2006.08.011. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1063458406002603>
- [4] ISO 14242-1:2012(E). Implants for surgery - Wear of total hipjoint prostheses: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental conditions for test. 2.vyd. Geneva: ISO copyright office, 2012.
- [5] BERGMANN, G., F. GRAICHEN a A. ROHLMANN. Hip joint loading during walking and running, measured in two patients. *Journal of Biomechanics*. 1993, roč. 26, č. 8, s. 969-990. ISSN 00219290. DOI: 10.1016/0021-9290(93)90058-M. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002192909390058M>
- [6] MATTEI, L., F. DI PUCCIO, B. PICCIGALLO a E. CIULLI. Lubrication and wear modelling of artificial hip joints: A review. *Tribology International*. 2011, roč. 44, č. 5, s. 532-549. ISSN 0301679x. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.06.010. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10001647>
- [7] M. Flannery, E. Jones, C. Birkinshaw, Analysis of wear and friction of total knee replacements part II: Friction and lubrication as a function of wear, *Wear*, roč. 265, č. 7–8, 20 September 2008, s. 1009-1016, ISSN 0043-1648, Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.023>.
- [8] Bishop, N. E., Hothan, A. and Morlock, M. M. (2013), High friction moments in large hard-on-hard hip replacement bearings in conditions of poor lubrication. *J. Orthop. Res.*, s. 807–813. DOI: 10.1002/jor.22255
- [9] J.A. Ortega-Sáenz, M.A.L. Hernández-Rodríguez, A. Pérez-Unzueta, R. Mercado-Solis, Development of a hip wear simulation rig including micro-separation, *Wear*, roč. 263, č. 7–12, 10 September 2007, s. 1527-1532, ISSN 0043-1648, Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.097>.
- [10] HARTL, M.; KRUPKA, I.; LIŠKA, M. Differential colorimetry: tool for evaluation of chromatic interference patterns. *Optical Engineering*. 1997, roč. 36, č. 9, s. 2384-2391. ISSN 0091-3286.
- [11] URBAN, F. Experimentální studium tření a mazání TEP kyčle. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

- [12] Česká republika. Metodika hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů. In: 04944/11-RVV. Praha, 2011, č. 340.
Dostupné z: <http://www.vyzkum.cz/FrontClanek.aspx?idsekce=608098>
- [13] PRAMANIK, Sumit a AGARWAL. *Chronology of Total Hip Joint Replacement and Material Development*. Trends in Biomaterials and Artificial Organs. 2005, roč. 19, č. 2.
- [14] BIERBAUM BE, HOWE KK. *Total hip arthroplasty: learning from both successes, failure – Early improvements involved techniques, materials; current issues focus on wear debris*. Orthopedics Today, Oct. 1999.
- [15] DRŽÍK, Milan a kol. 2008. *Moderná mikroskopie a digitálne spracovanie obrazu*. Bratislava. ISBN 978-80-89186-37-2.
- [16] SAIKKO VO. *Atree-axis hip joint simulator for wear and friction studies on total hip prostheses*. Proc Inst Mech Eng [H] 1996;210(3):175-85
- [17] SAIKKO, V. ; PAAVOLAINEN, P.; KLEIMOLA, M.; SLÚTIS, P.; *A five-station hip joint simulator for wear rate studies*. J Eng Med 1992, 206:195-200
- [18] M. VRBKA, D. NEČAS, M. HARTL, I. KŘUPKA, F. URBAN, J. GALLO, *Visualization of lubricating films between artificial head and cup with respect to real geometry*, Biotribology, Volumes 1–2, March–June 2015, Pages 61–65, ISSN 2352-5738, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotri.2015.05.002>.
- [19] Y. DONG, P. SVOBODA, M. VRBKA, D. KOSTAL, F. URBAN, J. CIZEK, P. ROUPCOVA, H. DONG, I. KRUPKA, M. HARTL, *Towards near-permanent CoCrMo prosthesis surface by combining micro-texturing and low temperature plasma carburising*, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Volume 55, March 2016, Pages 215-227, ISSN 1751-6161, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.10.023>.
- [20] HBM. [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/>
- [21] MISUMI. [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110300415830/?HissuCode=MLN10>
- [22] SKF. [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/splash/index.html>
- [23] Fagbearings [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.fagbearings.cn/bearinglist/UpFile/sphericalplainbearing.jpg>
- [24] Teatechnik [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.teatechnik.cz/img/produkty/sverna_pouzdra/tlk_132.jpg

- [25] FESTO [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: https://www.festo.com/cms/cs_cz/index.htm
- [26] Electroquip [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.electroquip.co.uk/components/com_redshop/assets/images/product/14CP19F7.jpg
- [27] Spínaný zdroj MEAN WELL SP-240-24 | GM electronic [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/spinany-zdroj-mean-well-sp-240-24-p332-285>
- [28] *Servomotory EMMS-AS*. 2015. Praha. Dostupné také z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/EMMS-AS_CZ.PDF
- [29] BARTOŠÍK, J. *Vliv velikosti hlavice na precesy tření a mazání v TEP kyčle*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 78 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

9

Zoznam skratiek

TEP	úplná bedrová endoprotéza
THR	úplná kĺbová náhrada
USB	Universal Serial Bus
UTP	Unshielded Twisted Pair
CAN	Controller Area Network
PLC	Programmable Logic Controller
UHMWPE	Ultra-High Molecular Weight Polyethylene
FE	Flexia/extenzia
AA	abdukcia/addukcia
IER	vonkajšia/vnútoraná rotácia
PCC	Phantom Camera Control

Zoznam symbolov a veličín

Označenie	Jednotka	Názov veličiny
Δz	m	rozpätie ostrosti
w_{plx}	m	šírka pixlu stanovené optickou aparátúrou
m	-	zväčšenie obrazu stanovené z objektívu
A	-	pracovná zostava
D	m	priemer hriadeľa
l	m	dĺžka puzdra
f	-	súčiniteľ trenia
M_k	Nm	krútiaci moment
K_s	-	bezpečnosť
n	-	počet použitých skrutiek
F_o	N	osová sila
p	Pa	tlak oblačenia
F_{max}	N	Maximálna zaťažovacia sila
K_k	-	súčiniteľ trenia
D_g	m	maximálny priemer hlavice
K_{kl}	-	súčiniteľ šmykového trenia
Dl	m	priemer ložiska
I	Kg/cm^2	moment zotrvačnosti
F_t	N	trecia sila
ω_{max}	rad/s	maximálne uhlové zrýchlenie
M_{kmax}	Nm	maximálny krútiaci moment
M_{k2}	Nm	krútiaci moment ložiska
Fl	N	trecia sila ložiska
M_{k1}	Nm	krútiaci moment
P	W	výkon motora
ω_{max}	ot/s	maximálne otáčky
v_{max}	m/s	maximálna rýchlosť
I	-	prevodový pomer
ω_{vn}	ot/s	výstupné otáčky

F_g	N	zaťažovacia sila
F_n	N	potrebná sila
K	-	súčiniteľ trenia medzi kontaktom oceľ a oceľ
m_t	kg	hmotnosť trŕu
m_n	kg	hmotnosť hlavice
g	m/s^2	gravitačné zrýchlenie zeme
m_{op}	kg	váha optickej aparatúry
r	m	rameno pôsobenia sily
m_{vs}	Nm	výsledný moment pôsobenia

10 ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV GRAFOU A TABULIEK 10

Zoznam obrázkov

Obr. 2-1 Zaťažovací cyklus: x-os čas cyklu v sekundách, y-os veľkosť zaťaženia v kN[4]	15
Obr. 2-2 Abdukcia/addukcia [4]	15
Obr. 2-3 Flexia/extenzia [4]	15
Obr. 2-4 Vnútná/vonkajšia rotácia[4]	16
Obr. 2-5 PLINT Durham friction simulator [7]	17
Obr. 2-6 Popis jednotlivých častí simulátora [7]	17
Obr. 2-7 Simulátor z Hamburg University of Technology [8]	18
Obr. 2-8 Priebeh zaťažovania[8]	18
Obr. 2-9 FIME II [9]	19
Obr. 2-10 Detail páky [9]	20
Obr. 2-11 Zaťažovací cyklus	20
Obr. 2-12 Zaťažovací cyklus [17]	20
Obr. 2-13 Mechanický popis zariadenia [17]	21
Obr. 2-14 Schematický popis zariadenia [16]	22
Obr. 2-15 Zaťažovací cyklus [16]	23
Obr. 2-16 Schéma fungovania zariadenia [18]	24
Obr. 2-17 Zaťažovací cyklus [19]	24
Obr. 2-18 Schéma pozorovania interferometrie [11]	25
Obr. 2-19 Acetabulová kĺbová jamka [11]	25
Obr. 4-1 Schéma prvého variantu	28
Obr. 4-2 Schéma druhého variantu	30
Obr. 5-1 3D vizualizácia zariadenia [17]	31
Obr. 5-2 Zaťažovací cyklus [17]	32
Obr. 5-3 Pneumatický valec	33
Obr. 5-4 Zaťažovací cyklus [20]	34
Obr. 5-5 Frekvenčný zosilňovač [20]	35
Obr. 5-6 Zlučovač tenzometrov [20]	35
Obr. 5-7 Kývavý hriadeľ	35
Obr. 5-8 Svorné púzdro [21]	36
Obr. 5-9 Detail na prepojenie prevodovky s hriadeľom	37
Obr. 5-10 Výpočtové parametre ložiska [22]	38
Obr. 5-11 Kĺbové ložisko [23]	38
Obr. 5-12 Svorné púzdro [24]	39
Obr. 5-13 Posuvný rám	39
Obr. 5-14 Výsledná analýza posuvného rámu	41
Obr. 5-15 Detail na kritickú časť trňa	41
Obr. 5-16 Charakteristika motora [25]	43
Obr. 5-17 Vytážovacia časť zariadenia	44
Obr. 5-18 Kompletná zostava kývavého hriadeľa a posuvného rámu	45
Obr. 5-19 Výsledok simulácie]	46
Obr. 5-20 Detail na kritické miesto simulácie	46
Obr. 5-21 Zostava meracej aparatury zariadenia	47
Obr. 5-22 Schematický popis uloženia platne	47

Obr. 5-23 Pákový mechanizmus výmeny hlavíc	48
Obr. 5-24 3D vizualizácia mechanizmu	49
Obr. 5-25 Schéma výpočtu rozmerov pre výmenu hlavice	49
Obr. 5-26 Prvý variant prípravku	51
Obr. 5-27 Druhý variant prípravku	51
Obr. 5-28 Silový rozbor	52
Obr. 5-29 Zostava ustálenia hlavice	53
Obr. 5-30 Zostava spodnej mechanickej časti zariadenia	54
Obr. 5-31 Konštrukcia rámu držiacej optickú aparatúru]	55
Obr. 5-32 Výsledná analýza optickej aparatúry	56
Obr. 5-33 Prípravok spevnenia	57
Obr. 5-34 PLC riadiaca jednotka s proporcionálnym ventilom	57
Obr. 5-35 Schéma zapojenia pneumatické systému	58
Obr. 5-36 Nosná konštrukcia zariadenia rozdelená na tri časti	59
Obr. 5-37 Prvý variant návrhu	60
Obr. 5-38 Druhý variant návrhu	61
Obr. 5-39 Tretí variant návrhu	61
Obr. 5-40 Vrchná časť rámovej konštrukcie	62
Obr. 5-41 Spodná časť rámovej konštrukcie	63
Obr. 5-42 Rozvodová skriňa	64
Obr. 5-43 Frekvenčný menič[26]	65
Obr. 5-44 Napäťový zdroj [27]	65
Obr. 5-45 Schéma zapojenia elektrických častí zariadenia	67
Obr. 5-46 Grafické rozhranie pre používateľa	68
Obr. 5-47 Schéma programu v LabView	69
Obr. 5-48 Užívateľské rozhranie	70
Obr. 5-49 Snímaní kontakt	71
Obr. 6-1 Detail na predĺženie objektívu	77
Obr. 6-2 Úprava prípravku	78
Obr. 6-3 Motorová charakteristika vybraného motora [28]	79
Obr. 6-4 Nové užívateľské rozhranie PLC jednotky	80
Obr. 7-1 Simulátor bedrového kĺbu	81

Zoznam grafov

Graf 5- 1 Priebeh záťažovej sily	72
Graf 5- 2 Dráha pohybu kývavého rámu	72
Graf 5- 3 Priebeh rýchlosti	73
Graf 5- 4 Veľkosť zaťažovacej sily v rovnovážnej polohe 0°	73
Graf 5- 5 Priebeh hrúbky mazacieho filmu pri každej rovnovážnej polohe 0°	74
Graf 5- 6 Porovnanie výsledkov zo súčasným simulátorom	75
Graf 5- 7 Porovnanie priebehu naklonu	75
Graf 5- 8 Priebeh porovnania rýchlosti	76

Zoznam tabuliek

Tab. 5- 1 Všeobecný prehľad použitých financií	70
---	----

11 ZOZNAM PRÍLOH

11

Príloha 1	Cenová rozvaha
Príloha 2	Zoznam výkresovej dokumentácie
Príloha 3	Fotografie zariadenia
Príloha 4	Analýza kývavého a posuvného rámu
Príloha 5	Analýza skrutkového spoja prevodovky
Príloha 6	Tabuľka meraných rozmerov hlavíc
Príloha 7	Analýza rámu optickej aparatúry
Príloha 8	Analýza celého nosného rámu
Príloha 9	Modálna analýza nosného rámu
Príloha 10	Schéme elektrického zapojenia

PRÍLOHA 1

Cenová rozvaha

Komponenta	Firma	bez DPH	cena s DPH	Počet	Zaplatená suma
Servo motor EMMS-SA-55-S-LS-TM	FESTO	32 131,13 Kč		1	38 878,67 Kč
Motor kabel NEBM-T1G7-E-10-N-LE7	FESTO	18 310,97 Kč		1	22 156,27 Kč
Encoder kabel NEBM-T1G8-E-10-N-S1G15	FESTO	15 517,72 Kč		1	17 379,85 Kč
motor control. CMMP-AS-C2-3A-MO	FESTO	32 957,88 Kč		1	39 879,03 Kč
Prevodovka					
WPLE040-040-SSSA3AB-Y9/20/40/63/B5/M5	Festo/Neugart	26 607,61 Kč		1	32 195,21 Kč
Pneumatický válec					
ADN-125	FESTO	16 441,72 Kč		1	19 894,48 Kč
Flange mounting FNC-125	FESTO	4 011,51 Kč		1	4 853,93 Kč
Hadice					
Plastic tubing PUN-10X1,5-BL	FESTO	1 152,95 Kč		1	1 395,07 Kč
Konfigurácia riadiacej jednotky					
50E-T33GCQSNIIYJ-D 32P-SGL-R-MQX-QE	FESTO	32 754,94 Kč		1	39 633,48 Kč
Tenzometr					
1-HLCB2C3/2.2T	HBM		12 238,00 Kč	3	36 714,00 Kč
1-VKK1-4A (spojovacia na tenzometri)	HBM		3 567,00 Kč	1	3 567,00 Kč
1-CABA1/1m (kábel)	HBM		90,00 Kč	1	90,00 Kč
1-AE301 (zesilovač)	HBM		14 152,00 Kč	1	14 152,00 Kč
Lineárne vedenie					
MLN10 Mechanical Locks	MISUMI		918,73 Kč	1	918,73 Kč
VSFJW16-250-MSC8-NSC8 LINEAR SHAFT	MISUMI		2 110,65 Kč	4	8 442,60 Kč
XYSG80 Double axis stage	MISUMI		14 753,79 Kč	1	14 753,79 Kč
LHBBF16 Linear bushing	MISUMI		325,88 Kč	4	1 303,52 Kč
Sverné púzdro					
TLK200 20x47	TOLLOK		764,70 Kč	1	764,70 Kč
Nastavovacie nožky					
K0421.100701	KIPP		69,19 Kč	4	276,75 Kč
K0415.2060	KIPP		120,37 Kč	4	481,48 Kč
Ložiská					
GE 30 C	SKF		655,20 Kč	2	1 310,40 Kč
Šrouby					
ISO 4762-M8-25-12.9	DEXIM		8,60 Kč	4	34,40 Kč
ISO 4762-M8-30-12.9	DEXIM		6,84 Kč	4	27,36 Kč
Podložky					
DIN 127B -M14	EXTE SPOS s.r.o		1,06 Kč	4	4,24 Kč
Šrouby					
ISO 4762-M14-100-12.9	HUP		13,20 Kč	4	52,80 Kč
Matice					
ISO 4032-M14-8	HUP		2,09 Kč	4	8,36 Kč
Podložky					
DIN 127B -M16	HUP		0,99 Kč	6	5,94 Kč
Šrouby					
ISO 4762-M14-55-12.9	EXTE SPOS s.r.o		41,33 Kč	6	247,98 Kč
Rýchlo upínacia matica					
K0156.10	KIPP		151,56 Kč	1	151,56 Kč
Záslepka jakeľ					
260 Q 2020 1,5 - 2	ALMS		2,00 Kč	1	2,00 Kč
260 Q 2525 1,5 -2	ALMS		2,00 Kč	1	2,00 Kč
260 Q 3030 1,5 - 2	ALMS		3,00 Kč	1	3,00 Kč
Gumové O-kružky					
NBR 70 SH 24,20x3	Alfaagro		3,10 Kč	3	9,29 Kč
FPM 80 SH 24,50x3	Alfaagro		16,98 Kč	3	50,93 Kč
Pružiny					
Pružina tlačná válcová 1,40x9,8x46x13	Pružiny Čermák		9,68 Kč	2	19,36 Kč
Seegerové posistky					
Seegerové posistky 8 DIN 471 vonkajšia	HRK Ložiska		0,25 Kč	6	1,50 Kč
Farba					
Farba červená na stredný rám	S-Universal s.r.o.		253,00 Kč	1	253,00 Kč
Prípravok na kameru					
Skrutka s okom DIN 444B M16	EXTE SPOS s.r.o		23,50 Kč	1	23,50 Kč
Dlhá matica M16	EXTE SPOS s.r.o		72,56 Kč	1	72,56 Kč

Farby a spreje					
červená farba 0,75l	Universal s.r.o		253,00 Kč	1	253,00 Kč
400 sprej farba 3020	Universal s.r.o		381,00 Kč	1	381,00 Kč
Elektro doplnky					
Šrouby s hrotom M3-6	EXTE SPOS s.r.o		1,19 Kč	4	4,76 Kč
Matica presná M20	EXTE SPOS s.r.o		16,32 Kč	2	32,64 Kč
ISO 4762-M14-55-12.9	EXTE SPOS s.r.o		30,52 Kč	6	183,12 Kč
Olaj do kompresoru Scheppach	GARTEKO s.r.o.		149,00 Kč	1	149,00 Kč
Matica presná M20	EXTE SPOS s.r.o		7,48 Kč	1	7,48 Kč
Svorkovnica PEN (sedemsvorková)	SCHRACK TECHNIK	30,72 Kč		1	37,17 Kč
Vývodka PG 11 s maticou	SCHRACK TECHNIK	7,68 Kč		8	74,34 Kč
Vývodka PG 16 s maticou	SCHRACK TECHNIK	9,60 Kč		2	23,23 Kč
Vypínač LTS20A, 3-pólový, červený, 20A, panel	SCHRACK TECHNIK	378,24 Kč		1	457,67 Kč
Lišta DIN 1HH, 15mm	SCHRACK TECHNIK	40,80 Kč		1	49,37 Kč
Svorka TE-2,5/0 PEN teleno-žltá	SCHRACK TECHNIK	39,88 Kč		2	96,51 Kč
Rozvádzač WS, 500x400x155, s montážnou doskou	SCHRACK TECHNIK	1659,84 Kč		1	2 008,41 Kč
Úhelník 90 typ 70x70x2x55 s prolisom	EXTE SPOS s.r.o		21,49 Kč	1	21,49 Kč
QS-1/4-6-I prípojka priama, IMBUS, vnútorný	J.S.C. Brno s.r.o	59,70 Kč		1	72,24 Kč
Trubka polyuretanová modrá 6x1	J.S.C. Brno s.r.o	19,50 Kč		3	70,79 Kč
ZBO-332-285	GM Eletronic		1 498,00 Kč	1	1 498,00 Kč
ZBO-680-029	GM Eletronic		28,00 Kč	3,2	89,60 Kč
ZBO-651-019	GM Eletronic		9,00 Kč	3	27,00 Kč
ZBO-651-139	GM Eletronic		9,00 Kč	3,7	33,30 Kč
ZBO-651-018	GM Eletronic		9,00 Kč	3	27,00 Kč
ZBO-656-442	GM Eletronic		25,00 Kč	3	75,00 Kč
ZBO-652-080	GM Eletronic		105,00 Kč	1	105,00 Kč
ZBO-614-021	GM Eletronic		89,00 Kč	1	89,00 Kč
ZBO-834-092	GM Eletronic		0,59 Kč	50	29,50 Kč
ZBO-834-093	GM Eletronic		0,59 Kč	50	29,50 Kč
ZBO-631-407	GM Eletronic		39,00 Kč	1	39,00 Kč
ZBO-070-310	GM Eletronic		6,60 Kč	3	19,80 Kč
ZBO-680-026	GM Eletronic		7,44 Kč	13	96,72 Kč
ZBO-650-221	GM Eletronic		11,90 Kč	5	59,50 Kč
ZBO-834-094	GM Eletronic		0,52 Kč	100	52,00 Kč
Kabel kulatý LIYCY 5x0,25mm2, vodič, 1xstienený	GES-ELECTRONICS		25,00 Kč	5	125,00 Kč
SLU-000-209	GM Eletronic		30,00 Kč	1	30,00 Kč
ZBO-656-036	GM Eletronic		1,12 Kč	20	22,40 Kč
ZBO-752-641	GM Eletronic		25,00 Kč	1	25,00 Kč
ZBO-820-273	GM Eletronic		30,00 Kč	4	120,00 Kč
ZBO-820-992	GM Eletronic		23,00 Kč	2	46,00 Kč
ZBO-834-094	GM Eletronic		52,00 Kč	1	52,00 Kč
Obojstránná gélová páska	Sára		436,00 Kč	1	436,00 Kč
ZBO-801-103	GM Eletronic		12,00 Kč	1	12,00 Kč
ZBO-110-097	GM Eletronic		2,60 Kč	6	15,60 Kč
SLU-000-209	GM Eletronic		30,00 Kč	1	30,00 Kč
ZBO-651-012	GM Eletronic		4,00 Kč	5	20,00 Kč
ZBO-651-285	GM Eletronic		5,00 Kč	5	25,00 Kč
ZBO-820-273	GM Eletronic		30,00 Kč	2	60,00 Kč
ZBO-834-096	GM Eletronic		0,59 Kč	50	29,50 Kč
Konektor D-sub-25 male	GES-ELECTRONICS		8,20 Kč	1	8,20 Kč
Výroba obrábaných dielov					
Obrábání diel z výkresu 01-05-01	WINSTON		1 226,56 Kč	3	3 679,68 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-05-02	WINSTON		3 426,56 Kč	1	3 426,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-07-02	WINSTON		4 426,56 Kč	1	4 426,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-07-03	WINSTON		6 026,56 Kč	1	6 026,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-07-04	WINSTON		1 526,56 Kč	1	1 526,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-07-05	WINSTON		1 226,56 Kč	1	1 226,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-07-06	WINSTON		3 226,56 Kč	1	3 226,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-07-07	WINSTON		4 426,56 Kč	1	4 426,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-07-08	WINSTON		1 426,56 Kč	1	1 426,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-08-01	WINSTON		1 826,56 Kč	1	1 826,56 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-08-02	WINSTON		2 326,56 Kč	2	4 653,12 Kč
Obrábání diel z výkresu 01-08-03	WINSTON		1 726,56 Kč	2	3 453,12 Kč
Výroba konštrukcie a zváraných dielov	Kratochvíl		37 800,00 Kč	1	37 800,00 Kč
Celková suma s DPH					384 384,54 Kč

PRÍLOHA 2

Zoznam výkresovej dokumentácie

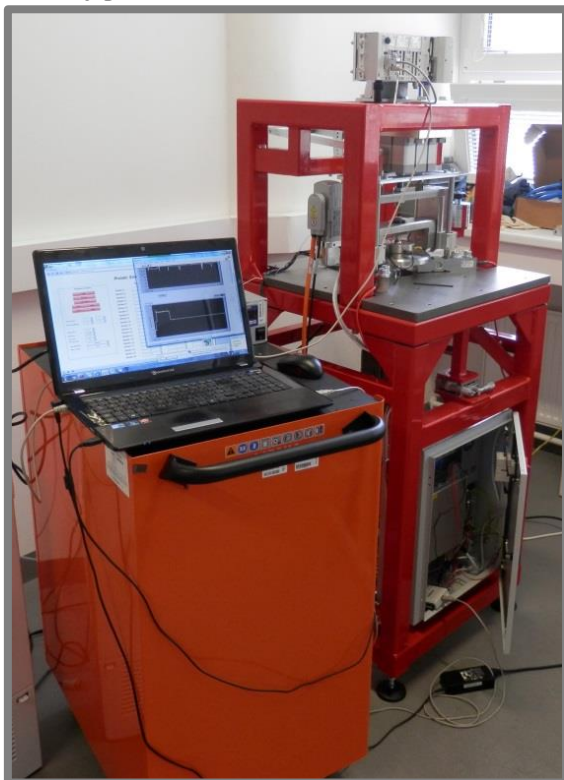
Bedrový simulátor	01-00	Očko	01-07-12
Rám	01-01-00	Strediaci prípravok	01-08-00
Spodná časť rámu	01-01-01-00	Rúčka	01-08-01
Rebro 1	01-01-01-01	Kužel	01-08-02
Upevňovacia plošina kamery	01-01-01-02	Puzdro	01-08-03
Rebro 2	01-01-01-03	Poistné T	01-09
Upevňovací plech 1	01-01-01-04	Cep 1	01-10
Upevňovací plech 2	01-01-01-05	Cep 2	01-11
Podložka pre nohy	01-01-01-06	Úchyt PLC	01-12-00
Upínací plech	01-01-01-07	Spodná platňa	01-12-01
Vrchná časť rámu	01-01-02-00	Stredný držiak	01-12-02
Spojovací plech	01-01-02-01	Rebro	01-12-03
Záslepka	01-01-02-02	Úchyt	01-12-04
Očko	01-01-02-03	Príruba rozvádzača	01-13
Rebro	01-01-02-04	Prípravok spevnenia	01-14-00
Stredná časť rámu	01-01-03-00		
Základná platňa	01-01-04		
Páka	01-02-00		
Ľavý bok páky	01-02-01		
Pravý bok páky	01-02-02		
Tiahlo	01-02-03		
Rúčka	01-02-04		
Čap	01-02-05		
Plech aretácia	01-03		
Držiak Mikr. Kamery	01-04-00		
Spodná platňa	01-04-01		
Vodiaca tyč	01-04-02		
Podpora pod acetábulum	01-05-00		
Cep	01-05-01		
Doska acetábula	01-05-02		
Lineárne vedenie	01-06-00		
Vrchná platňa	01-06-01		
Posuvná časť	01-07-00		
Protizávažie	01-07-01-00		
Konštrukcia	01-07-01-01-00		
Upínací plech	01-07-01-01-02		
Príruba	01-07-01-01-01		
200g závažie	01-07-01-02		
100g závažie	01-07-01-03		
500g závažie	01-07-01-04		
Domček ložiska 1	01-07-02		
Kývavý rám	01-07-03		
Hriadel' 1	01-07-04		
Hriadel' 2	01-07-05		
Vrchná časť	01-07-06		
Domček ložiska 2	01-07-07		
Výsuvný trň	01-07-08		
Prírubové puzdro	01-07-09		
Prírubový pol prsteň	01-07-10		
Vymedzovacia podložka	01-07-11		

Pozn.: Tučne zvýraznené výkresy sú priložené v papierovej forme. Ostatné výkresy sú k dispozícii iba na priloženom CD.

PRÍLOHA 3

Fotografie zariadenia

Celkový pohľad na zariadenie



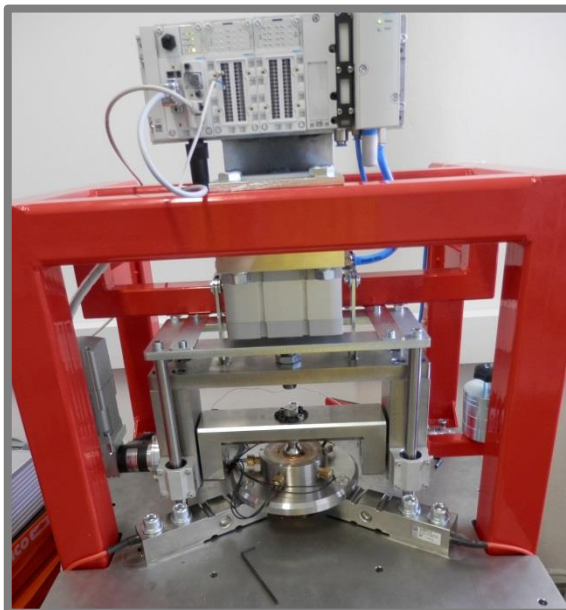
Celkový pohľad na zariadenie



Celkový pohľad do skrine rozvádzača



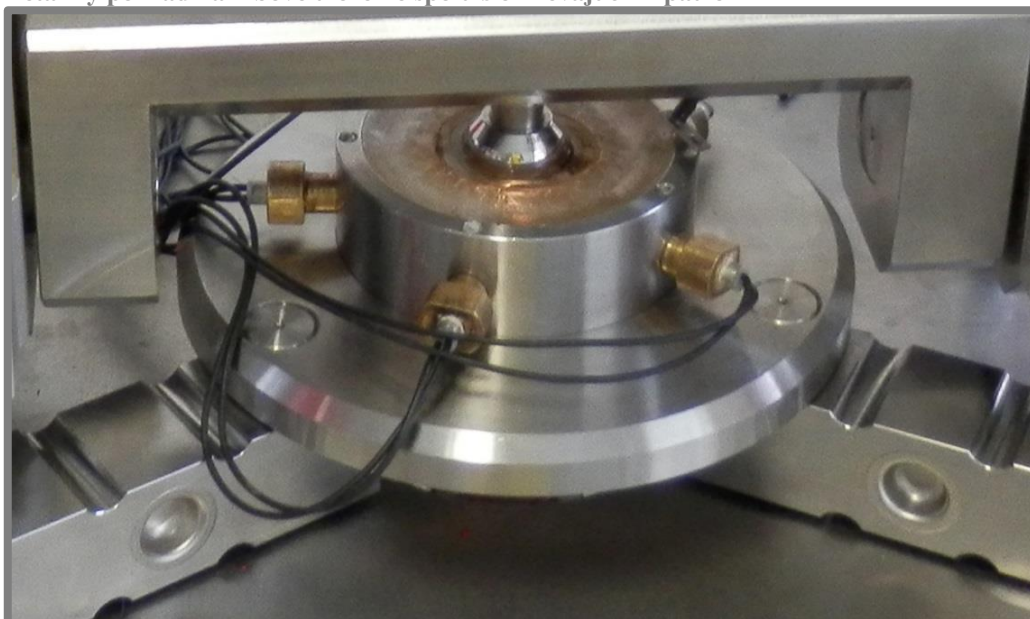
Pohľad na vrchnú mechanickú časť



Pohľad na spodnú mechanickú časť



Detailný pohľad na kĺbové uloženie spolu s ohrievajúcimi patrónmi



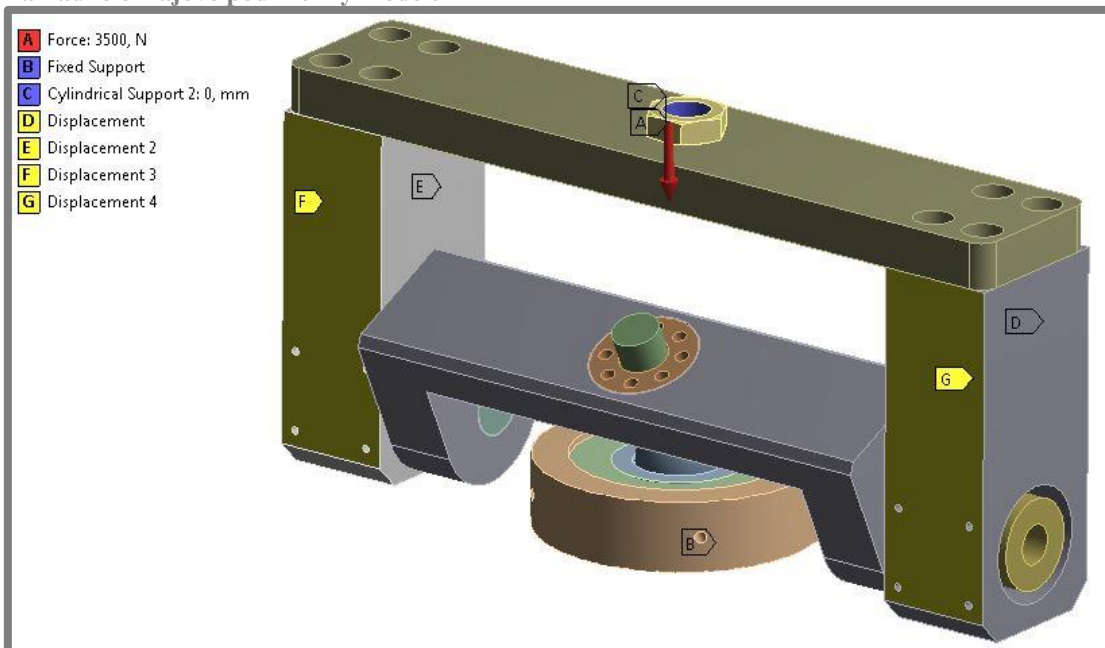
PRÍLOHA 4

Analýza kývavého a posuvného rámu

Výpočtová sieť modelu



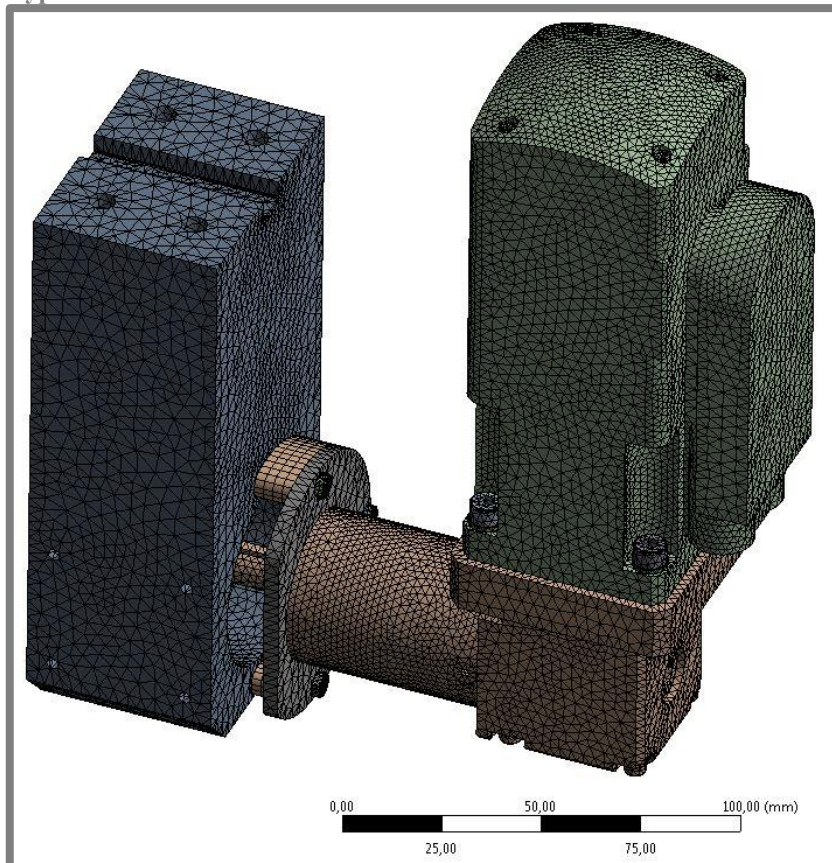
Základné okrajové podmienky modelu



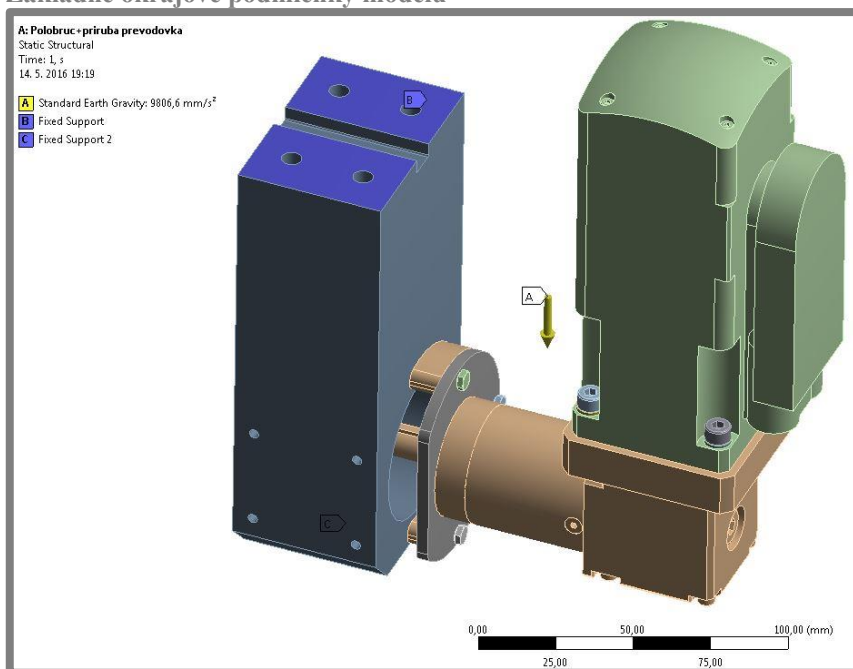
PRÍLOHA 5

Analýza skutkového spoja prevodovky

Výpočtová sieť modelu



Základné okrajové podmienky modelu



PRÍLOHA 6

Tabuľka meraných rozmerov hlavíc

Vzdialenosť od osi podložky pre sklenené acetábula rozmery v mm

PRIEMER KLBU / VONKAJŠÍ PRIEMER MISKY	38
26	38
28	15
32	15
36	15
40	15

Vzdialenosť od osi podložky pre keramických a kovových acetábulách rozmery v mm

PRIEMER KLBU / VONKAJŠÍ PRIEMER MISKY	53	38
26	14,5	7
28	13,5	6
32	11,5	4
36	9,5	2
40	7,5	X

Vzdialenosť od osi podložky pre umelé acetábula rozmery v mm

PRIEMER KLBU / VONKAJŠÍ PRIEMER MISKY	48	50	52	56
26	12	13	14	16
28	11	12	13	15
32	9	10	11	13
36	7	8	9	11
40	5	6	7	9

Vzdialenosť osi od začiatku pre sklenené acetábula rozmery v mm

PRIEMER KLBU / VONKAJŠÍ PRIEMER MISKY	38
26	28
28	29
32	31
36	33
40	35

Vzdialenosť osi od začiatku pre keramické a kovové acetábula rozmery v mm

PRIEMER KLBU / VONKAJŠÍ PRIEMER MISKY	38	53
26	20	27,5
28	20	27,5
32	20	27,5
36	20	27,5
40	20	27,5

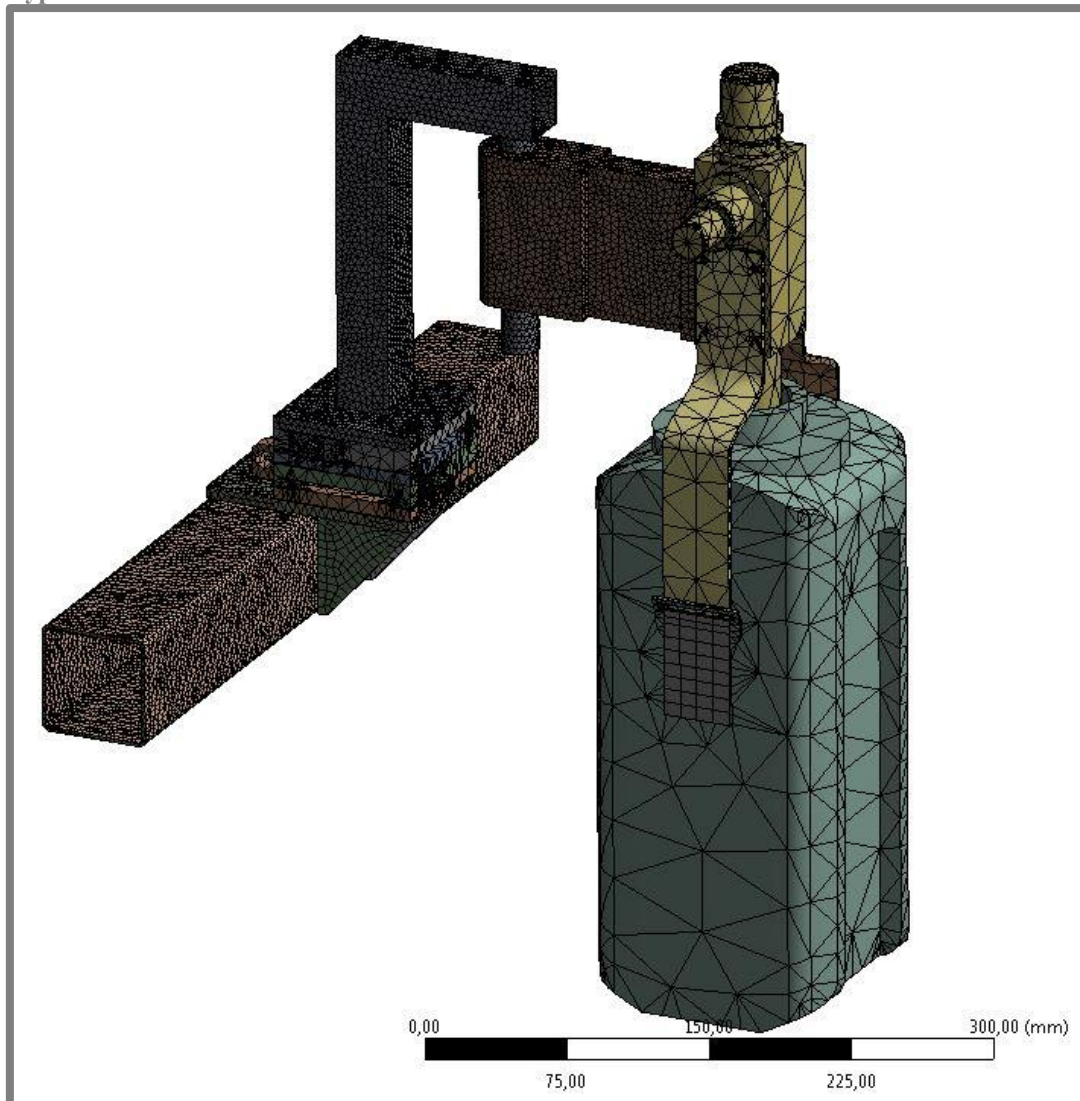
Vzdialenosť osi od začiatku pre umelé acetábula rozmery v mm

PRIEMER KLBU / VONKAJŠÍ PRIEMER MISKY	48	50	52	56
26	25	26	27	29
28	25	26	27	29
32	25	26	27	29
36	25	26	27	29
40	25	26	27	29

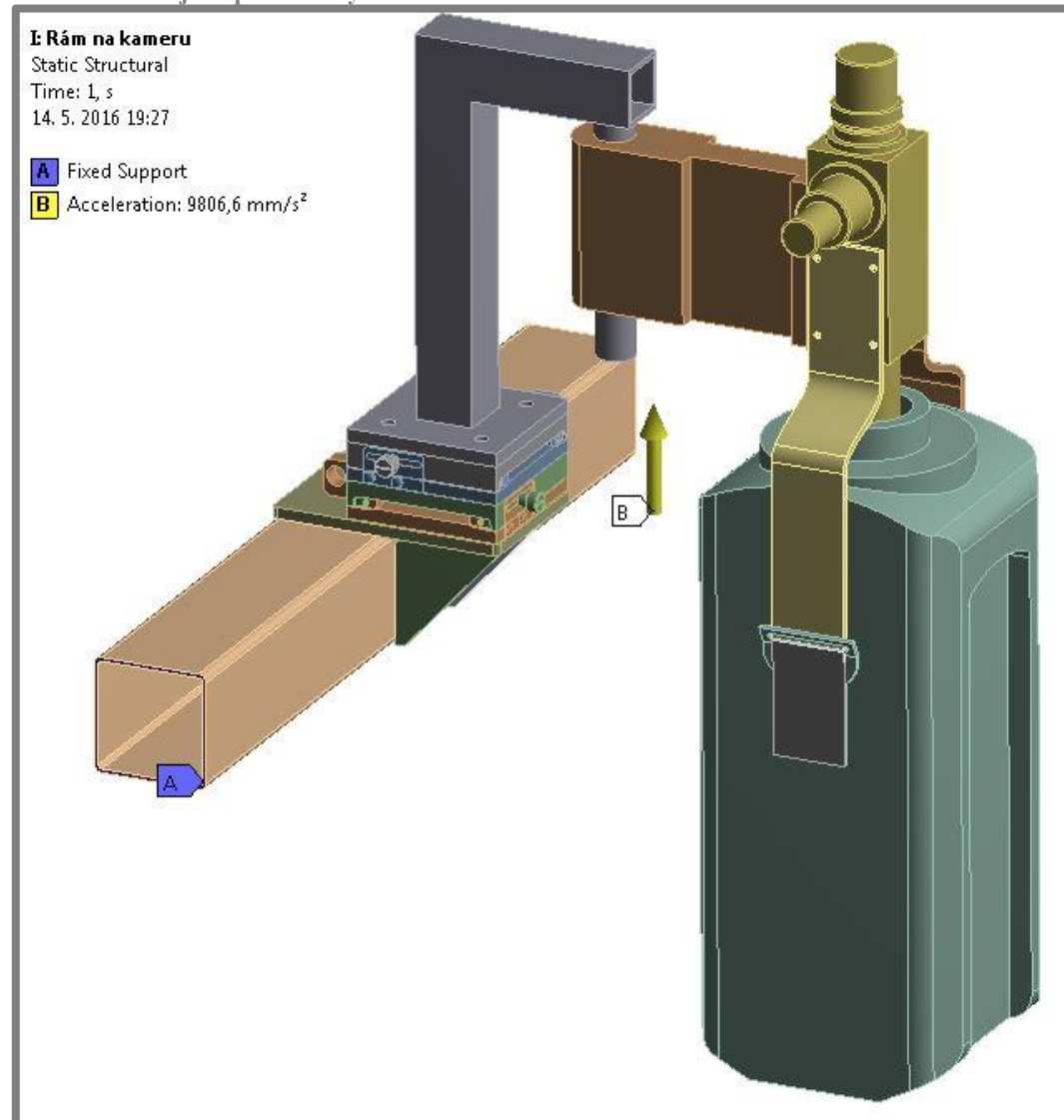
PRÍLOHA 7

Analýza rámu optickej aparatúry

Výpočtová sieť modelu



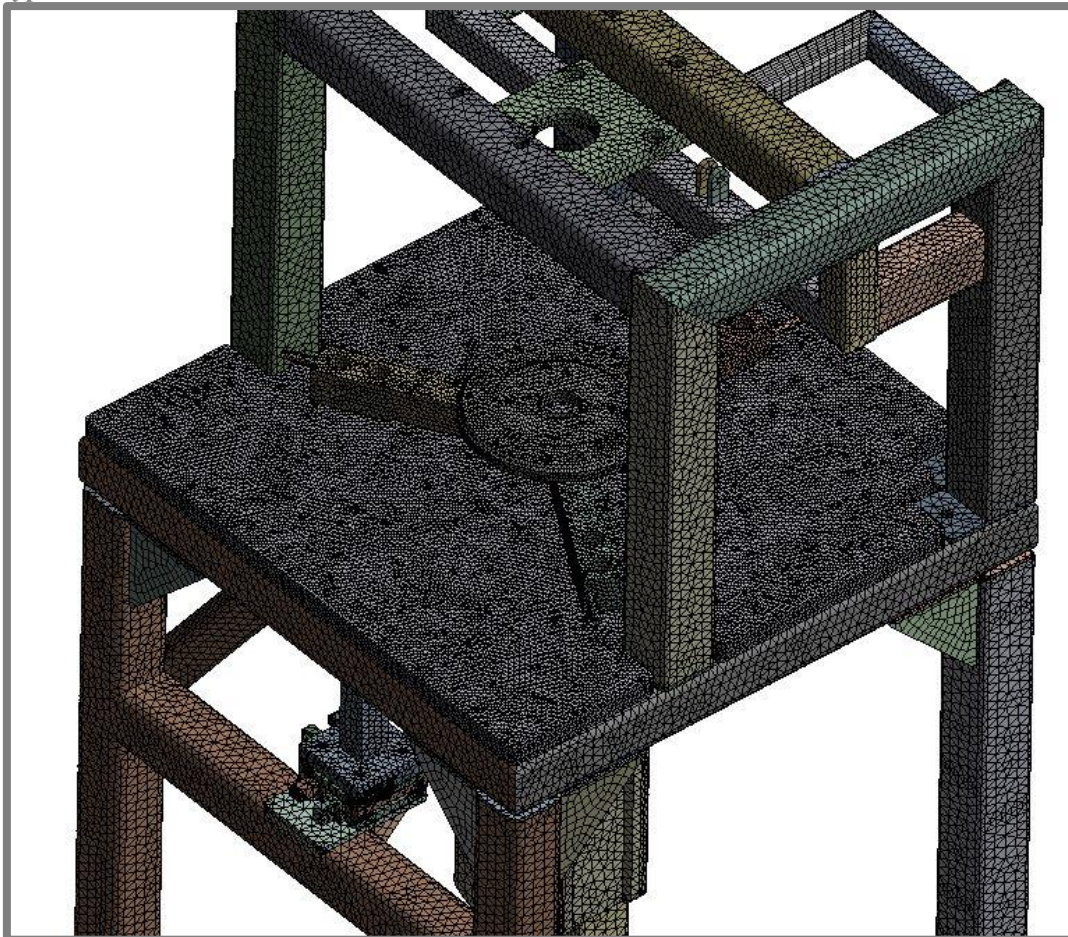
Základné okrajové podmienky modelu



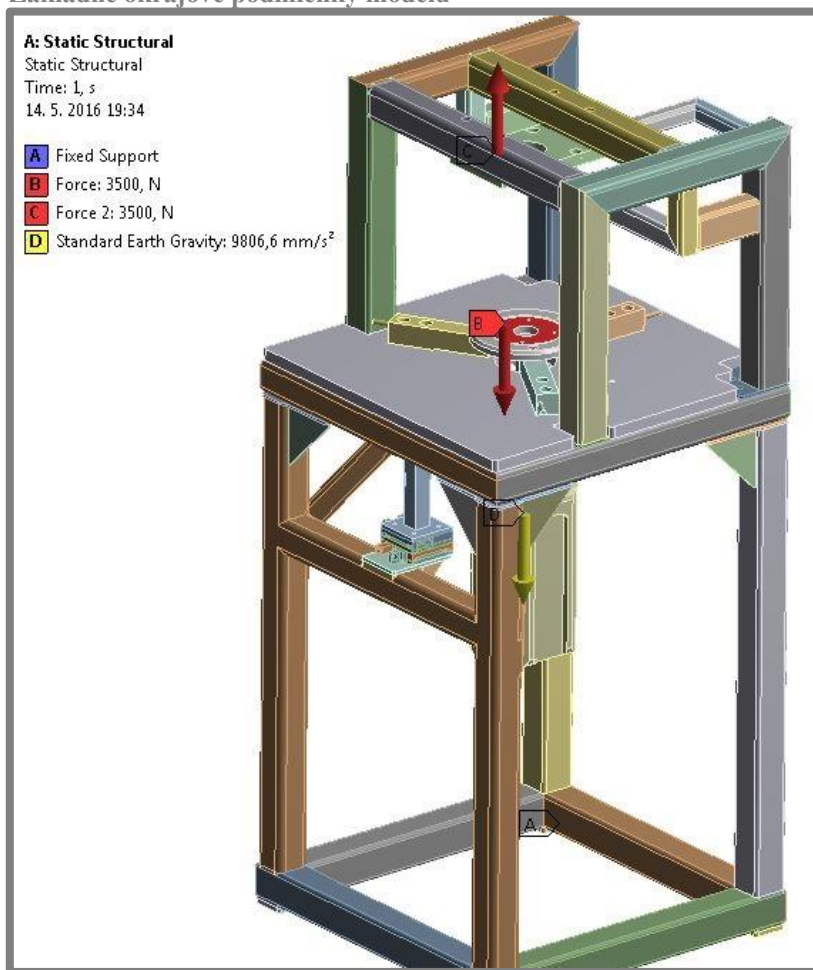
PRÍLOHA 8

Analýza celého nosného rámu

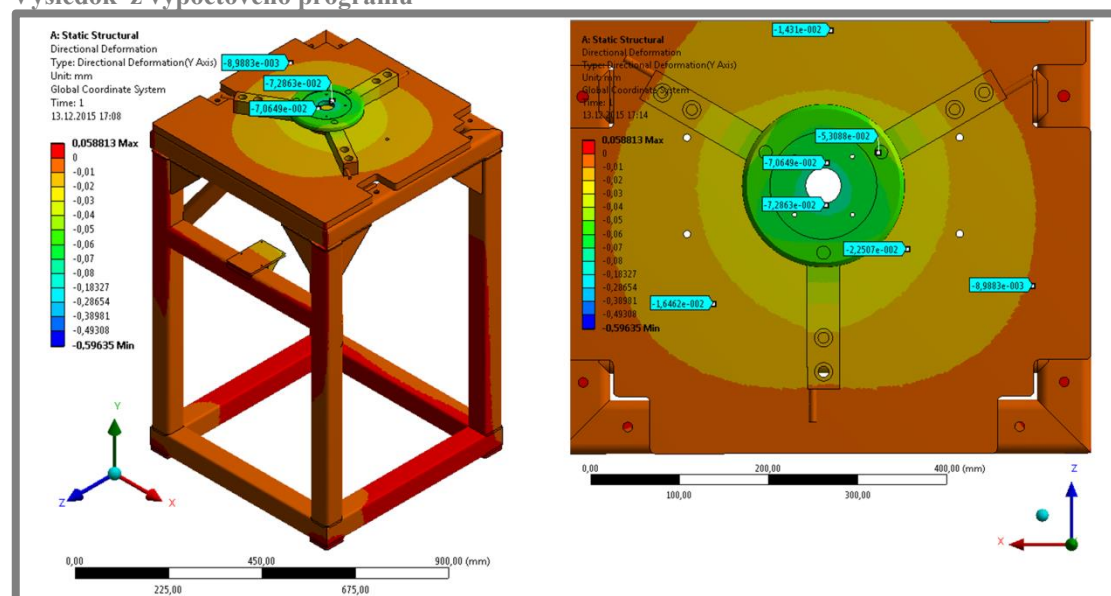
Výpočtová sieť modelu



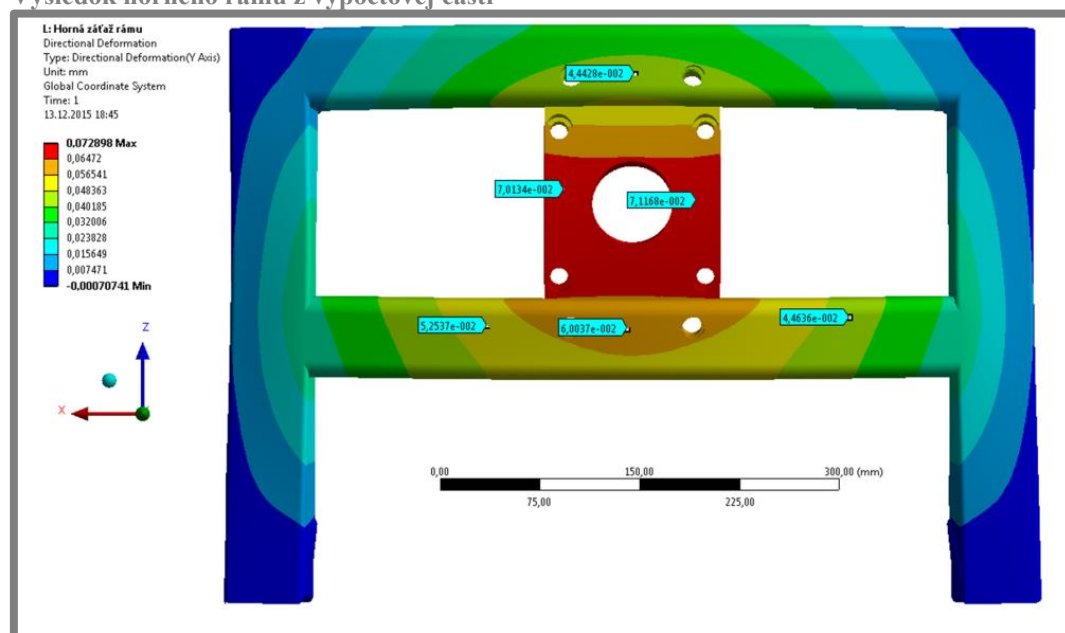
Základné okrajové podmienky modelu



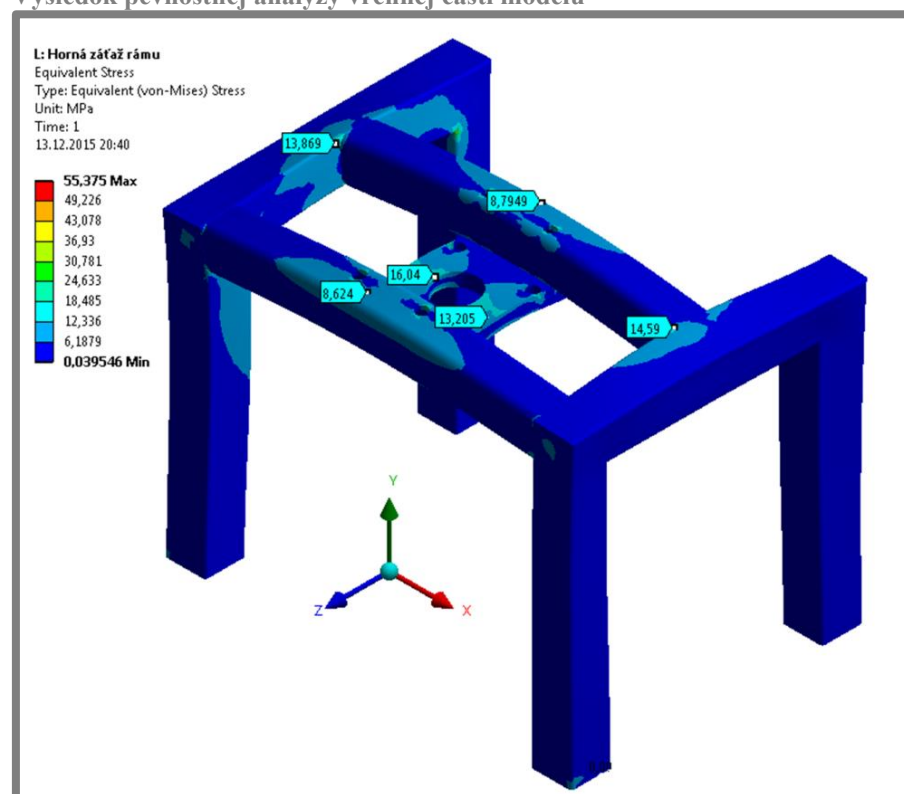
Výsledok z výpočtového programu



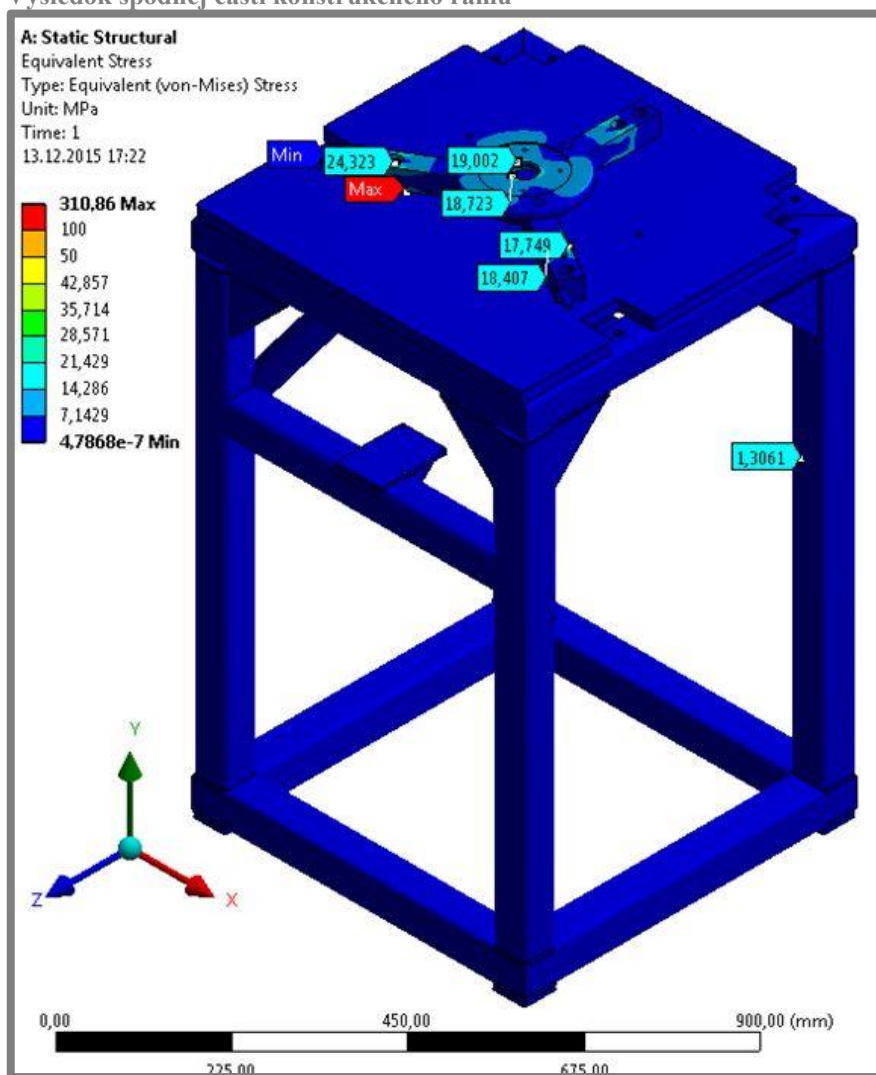
Výsledok horného rámu z výpočtovej časti



Výsledok pevnostnej analýzy vrchnej časti modelu



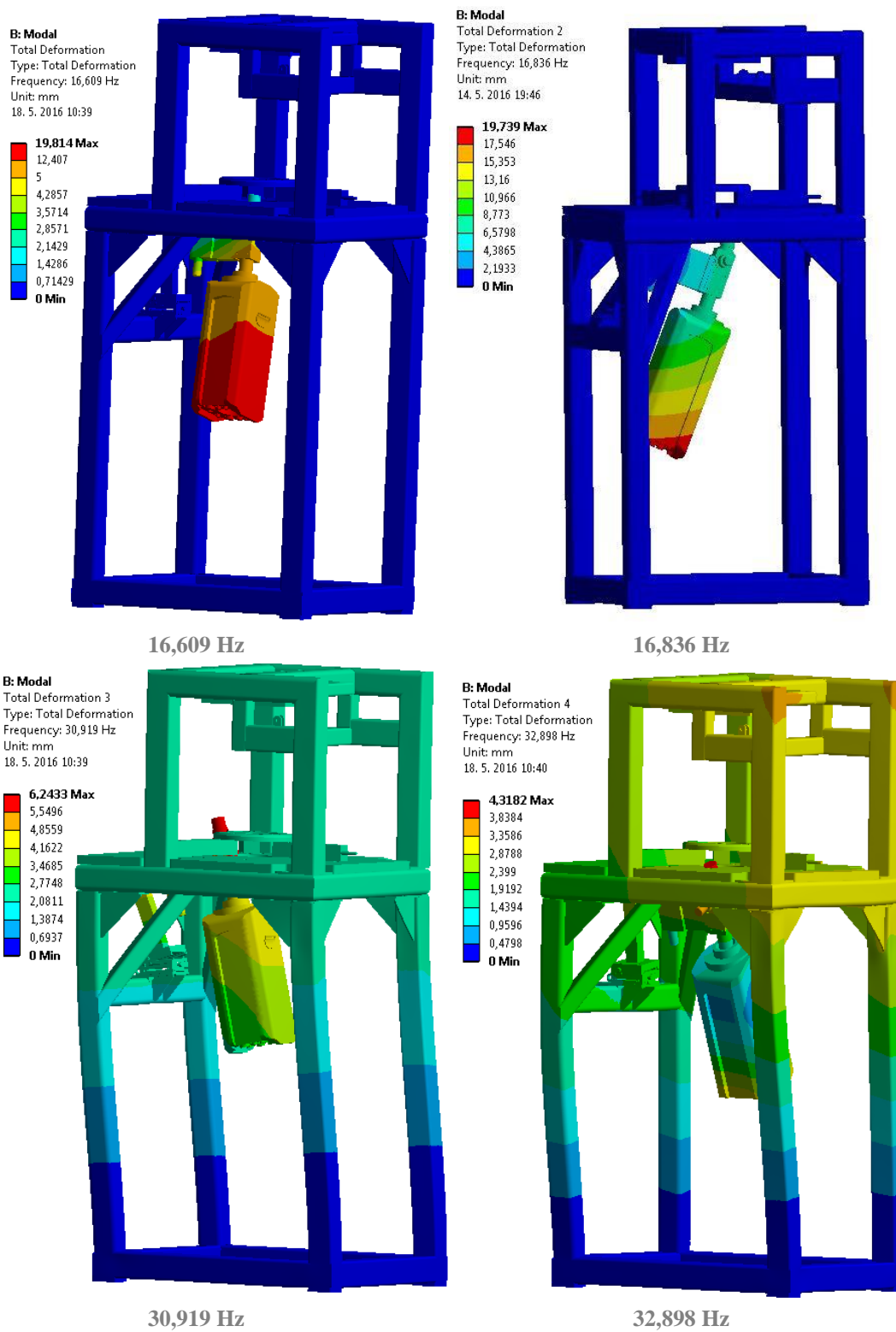
Výsledok spodnej časti konštrukčného rámu



PRÍLOHA 9

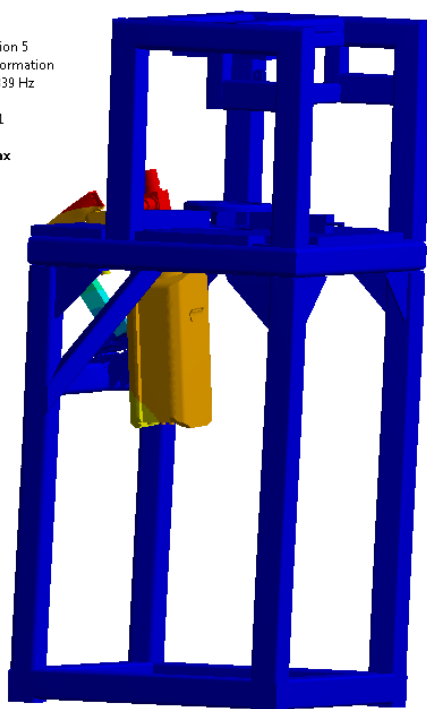
Modálna analýza nosného rámu

Výsledok modálnej analýzy konštrukčného rámu spolu s kamerovým systémom



B: Modal
 Total Deformation 5
 Type: Total Deformation
 Frequency: 44,839 Hz
 Unit: mm
 18. 5. 2016 10:41

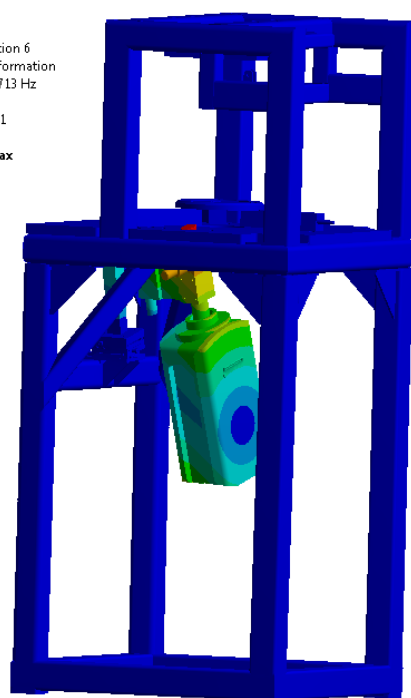
11,773 Max
 10,465
 9,1568
 7,8487
 6,5406
 5,2325
 3,9244
 2,6162
 1,3081
0 Min



44,839 Hz

B: Modal
 Total Deformation 6
 Type: Total Deformation
 Frequency: 48,713 Hz
 Unit: mm
 18. 5. 2016 10:41

26,183 Max
 23,274
 20,365
 17,455
 14,546
 11,637
 8,7277
 5,8184
 2,9092
0 Min



48,713 Hz